

**SIMULACIÓN DE DESEMPEÑO DE LAS TECNOLOGÍAS LTE Y WRAN PARA
USO EN ZONAS RURALES DEL DEPARTAMENTO DEL CHOCÓ**

ANDRÉS JAVIER SIERRA

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ D.C
2015**

**SIMULACIÓN DE DESEMPEÑO DE LAS TECNOLOGÍAS LTE Y WRAN PARA
USO EN ZONAS RURALES DEL DEPARTAMENTO DEL CHOCÓ**

ANDRÉS JAVIER SIERRA

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
SEMILLERO SMARTIC**

**Docente Tutor
Ing. Henry Bastidas Mora, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ D.C
2015**

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá 15 de diciembre de 2015

CONTENIDO

pág.

LISTA DE ILUSTRACIONES	7
LISTA DE TABLAS	9
GLOSARIO	10
OBJETIVOS.....	13
RESUMEN.....	14
INTRODUCCIÓN	15
1. LA BANDA ANCHA.....	17
1.1 IMPORTANCIA DE LA BANDA ANCHA	17
1.2 POLÍTICAS NACIONALES.....	19
1.2.1 Entes Gubernamentales.....	21
1.3 TENDENCIAS INTERNACIONALES	23
1.4 PROYECTO DE CONECTIVIDAD DE ALTA VELOCIDAD	24
1.4.1 Municipios	25
2. RED INALÁMBRICA DE ÁREA REGIONAL	29
2.1 RADIO COGNITIVA	29
2.2 ESTÁNDAR IEEE 802.22 WRAN	29
2.2.1 Arquitectura	32
2.2.1.1 Capa PHY (Physical Layer).....	35
2.2.1.2 Capa MAC (Medium Access Control).....	37
2.2.1.3 Componentes del plano cognitivo	39
3. LTE (Long Term Evolution)	41
3.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE LTE	41
3.1.1 Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM)	41
3.1.2 Técnica de múltiple acceso OFDMA y SC-FDMA	41
3.2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE	42
3.2.1 Equipo de Usuario UE	43
3.2.2 Red de Acceso de Radio Terrestre Evolucionada UMTS (E-UTRAN)	44
3.2.3 Núcleo de Paquetes Evolucionada EPC	45

3.3 PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN.....	47
3.3.1 Protocolos de Capa Física	48
3.3.2 Bloque de Recursos Físicos (Physical Resource Block)	49
4. SIMULACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS	50
4.1 DIVIDENDO DIGITAL.....	50
4.2 RADIO MOBILE	52
4.2.1 Modelo de Propagación.....	53
4.2.1.1 Modelo de Propagación Longley - Rice.....	53
4.2.2 Simulación de Cobertura WRAN	54
4.2.3 Simulación de Cobertura LTE	56
4.2.4 Desarrollo y resultados de la simulación de cobertura LTE y WRAN	58
4.2.4.1 Acandí	58
4.2.4.2 Nuquí.....	60
4.2.4.3 Ungía.....	62
4.3 OMNET ++	64
4.3.1 Simulación del Estándar IEEE 802.22.....	66
4.3.1.1 Simulación de Ping.....	69
4.3.1.2 Simulación de Archivos FTP	70
4.3.1.3 Simulación de Transmisión de Archivos de Video.....	71
4.3.2 Simulación de LTE	72
4.3.2.1 Simulación de Ping.....	74
4.3.2.2 Simulación de Archivos FTP	75
4.3.2.3 Simulación de Transmisión de Archivos de Video.....	76
5. ANÁLISIS DE SIMULACIONES Y DE RESULTADOS	77
5.1 COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS.....	77
5.2 CONSOLIDADO Y RESULTADOS DE COBERTURA WRAN	79
5.3 CONSOLIDADO Y RESULTADOS DE COBERTURA LTE	80
5.4 COMPARACIÓN DE COBERTURA LTE CON WRAN.....	81
5.5 COMPARACIÓN DE LA RED CON OMNET ++	82
5.5. 1 Comparación de resultados de LTE contra WRAN – ping.....	82
5.5.2 Comparación de resultados de LTE contra WRAN – ftp	83
5.5.3 Comparación de resultados de LTE contra WRAN – video.....	84
5.5.4 Consolidado de las simulaciones con OMNET ++	85

CONCLUSIONES	86
RECOMENDACIONES.....	88
BIBLIOGRAFÍA	89

LISTA DE ILUSTRACIONES

pág.

Ilustración 1. Correlación entre pobreza y usuarios de internet 2010	18
Ilustración 2. Índice de competitividad 2010	19
Ilustración 3. Mapa del municipio de Acandí.....	26
Ilustración 4. Mapa del municipio de Nuquí	27
Ilustración 5. Mapa del municipio de Ungía	28
Ilustración 6. Rangos y Modulaciones del Estándar IEEE 802.22	30
Ilustración 7. Bonding Channel	31
Ilustración 8. Arquitectura IEEE 802.22	32
Ilustración 9. Modelo de referencia	33
Ilustración 10. Estación Base BS	34
Ilustración 11. Equipo Local del Cliente CPE	35
Ilustración 12. Sub-Capas PHY	36
Ilustración 13. Estructura de trama en modo normal (Súper trama Marco)	38
Ilustración 14. Estructura de trama en modo convivencia (Súper trama).....	38
Ilustración 15. Tipos de Antena del CPE	39
Ilustración 16. Arquitectura LTE.....	42
Ilustración 17. Diseño interior UE.....	43
Ilustración 18. Arquitectura E-UTRAN	44
Ilustración 19. Red de acceso E-UTRAN e Interfaces	45
Ilustración 20. Núcleo de paquetes evolucionada EPC	46
Ilustración 21. Pila de protocolos	47
Ilustración 22. Relación entre el acceso y sin el acceso en la interfaz de radio.....	48
Ilustración 23. Protocolos de transporte interfaz aire	49
Ilustración 24. Banda del "Dividendo Digital" para la región 2	51
Ilustración 25. Rangos de cobertura	52
Ilustración 26. Escenario típico	55
Ilustración 27. Escala de colores mapa de cobertura	56
Ilustración 28. Escenario típico	57
Ilustración 29. Escala de colores mapa de cobertura	58
Ilustración 30. Ubicación Estación Base	59
Ilustración 31. Escenario típico WRAN	59
Ilustración 32. Escenario típico LTE.....	59
Ilustración 33. Cobertura WRAN.....	60
Ilustración 34. Cobertura LTE	60
Ilustración 35. Ubicación Estación Base	61
Ilustración 36. Escenario típico WRAN	61
Ilustración 37. Escenario típico LTE.....	61

Ilustración 38. Cobertura WRAN.....	62
Ilustración 39. Cobertura LTE	62
Ilustración 40. Ubicación Estación Base	63
Ilustración 41. Escenario típico WRAN	63
Ilustración 42. Escenario típico LTE.....	63
Ilustración 43. Cobertura WRAN.....	64
Ilustración 44. Cobertura LTE	64
Ilustración 45. Código tamaño ROI	66
Ilustración 46. ROI	66
Ilustración 47. Red de Simulación WRAN.....	67
Ilustración 48. Sistema de radio cognitiva.....	68
Ilustración 49. Diagrama CPE.....	68
Ilustración 50. Diagrama estación base BS	69
Ilustración 51. Resultado carga de la red - ping.....	70
Ilustración 52. Conexión servidor ftp.....	71
Ilustración 53. Resultados transmisión de video	72
Ilustración 54. Red de Simulación LTE	73
Ilustración 55. Diseño interno UE.....	73
Ilustración 56. Diagrama de eNodeB	74
Ilustración 57. Resultado ping.....	75
Ilustración 58. Conexión servidor ftp.....	76
Ilustración 59. Resultados archivos de video	76
Ilustración 60. Cobertura WRAN.....	79
Ilustración 61. Cobertura LTE	81
Ilustración 62. Comparativo entre LTE y WRAN - ping	83
Ilustración 63. Comparativo entre LTE y WRAN - ftp.....	84
Ilustración 64. Comparativo entre LTE y WRAN - streaming	85

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Consejo Nacional de Política Económica y Social	20
Tabla 2. Municipios Beneficiados por el PNCAV del Departamento del Chocó	25
Tabla 3. Componentes de la EPC.....	46
Tabla 4. Parámetros de simulación estándar IEEE 802.22.....	55
Tabla 5. Parámetros de simulación.....	57
Tabla 6. Comparativo de las dos tecnologías	77
Tabla 7. Análisis de cobertura.....	80
Tabla 8. Análisis de cobertura.....	81
Tabla 9. Cobertura	82

GLOSARIO

3GPP: proyecto de tercera generación asociado.

BS: estación base.

CPE: equipo local del cliente.

CPS: subcapa parte común.

dB: decibelio.

dBi: decibelio isótropo.

dBm: decibelio milivatio.

DNS: sistema de nombres de dominio.

DTED: datos de elevación digital del terreno.

EIR: registro de identidad de equipo.

EIRP: potencia isotrópica radiada equivalente.

EPC: núcleo de paquetes evolucionado.

EPS: sistema de paquetes evolucionado.

ERE: espectro radio eléctrico.

EUTRAN: red de acceso de radio terrestre universal evolucionada.

FCC: comisión general de comunicaciones.

FDD: duplexación por división de frecuencia.

FDMA: acceso múltiple por división de frecuencia.

FTP: protocolo de transferencia de archivos.

GL: geo-localización.

HLR: registro de localización de usuarios locales.

HSDPA: transferencia de paquetes a alta velocidad.

HSR: receptor de alta sensibilidad.

HSS: servidor de abonado local.

IETF: grupo de trabajo de ingeniería de internet.

IMEI: identidad internacional de equipo móvil.

IMS: subsistema multimedia IP.

IP: protocolo de internet.

ISI: interferencia inter símbolo.

ITM: modelo de terreno irregular.

LTE: evolución a largo plazo.

MAC: capa de acceso al medio.

ME: equipo móvil.

MIMO: múltiples entradas múltiples salidas.

MME: entidad de gestión de movilidad.

MT: terminal móvil.

NAS: no acceso al estrato.

NCMS: sistema de control y gestión de la red.

NMS: sistema de gestión de red.

NSN: redes de nueva generación.

OFDM: multiplexación por división de frecuencias ortogonales.

OFDMA: acceso por multiplexación por división de frecuencias ortogonales.

PCRF: políticas y reglamento de carga de funciones.

PDCP: protocolo de convergencia de datos por paquetes.

PDN: puerta de enlace.

PDU: protocolo de unidad de datos.

PER: tasa de error por paquete.

P-GW: puerta de red de paquete de datos.

PHY: capa física.

PIB: producto interno bruto.

PLCP: protocolo de convergencia de capa física.

PMD: medio físico dependiente.

PRB: bloque de recursos físicos.

PRM: modelo de referencia de protocolo.

QAM: modulación de amplitud en cuadratura.

QoS: calidad de servicio.

QPSK: modulación por desplazamiento de fase.

RB: bloque de recursos.

RC: radio cognitiva.

RF: radio frecuencia.

SAE: sistema evolucionado de arquitectura.
SAP: servicio inalámbrico.
SDMA: acceso múltiple por división espacial.
S-GW: puerta de servicio.
SIM: módulo de identificación del suscriptor.
SM: gestor del espectro.
SNMP: protocolo de gestión de red simple.
SRTM: misión de transbordador del radar topográfico.
SS: detección de espectro.
SSA: automatización de detección del espectro.
TM: modo de transporte.
UE: equipo de usuario.
UICC: módulo de subscripción de usuario.
UM: modo de no-reconocimiento.
UTRAN: red de acceso de radio terrestre universal.
VLR: registro de localización de visitantes.
VoIP: voz sobre protocolo de Internet.
WM: medio inalámbrico.
WRAN: red inalámbrica de área regional.

OBJETIVOS

GENERAL

Realizar un estudio comparativo entre las tecnologías LTE y WRAN a través de simulaciones para conocer su desempeño en zonas rurales del departamento de Chocó.

ESPECÍFICOS

Escoger tres zonas rurales del Departamento del Chocó con diferentes escenarios de propagación donde no haya acceso al servicio de banda ancha.

Efectuar un comparativo de las características técnicas y de desempeño entre la tecnología LTE y WRAN.

Simular la implementación de la red LTE y WRAN en los escenarios escogidos, para analizar su comportamiento, viabilidad y generar recomendaciones.

RESUMEN

El contenido de este documento hace una comparación del desempeño de las tecnologías WRAN y LTE para implementar en el departamento del Chocó, como propuesta para complementar el Proyecto Nacional de Alta Conectividad. Dicha comparación, se desarrolla en tres Municipios del departamento del Chocó y se enmarca dentro de la línea de investigación “TIC y Cambio climático” que se viene trabajando dentro del semillero de investigación SmarTIC, del programa de Ingeniería de Telecomunicaciones.

Inicialmente, se muestra la importancia de la banda ancha para el desarrollo de los países, soportado con estudios que muestran como, al brindar mayor cobertura se puede aumentar el crecimiento económico, evidenciándose en el incremento del PIB y beneficiando a los sectores productivos y a la población en general. Además, se nombran los entes gubernamentales que regulan el sector y las tendencias internacionales que atañen a la banda ancha.

Para escoger los municipios, se tuvieron en cuenta diferentes aspectos geográficos: primero se eligió uno próximo al mar Caribe como es Acandí, luego, uno contiguo al océano Pacífico que corresponde a Nuquí y finalmente uno que tiene como accidente topográfico una ciénaga, que es el municipio de Ungía.

Luego, se describen las tecnologías WRAN y LTE y se identifican los parámetros a simular, por lo que se escogen los simuladores que implementen ambas tecnologías para tener igualdad en los resultados a comparar.

La primera simulación es la de cobertura y se realiza con en el software Radio Mobile, que es una herramienta gratuita empleada para predecir el rendimiento del sistema de radio. El simulador toma datos de elevación del terreno, datos ambientales y otros parámetros que alimentan el modelo de propagación Longley - Rice, para predecir la cobertura de la señal en un sector. La segunda simulación es de la red y se realiza con el software OMNET ++, que cuenta con una versión con licencia educativa. Se evalúa la capacidad de la red, se realizan pruebas de conectividad comparando cantidad de usuarios con el ancho de banda, luego se realizan pruebas de envío de archivos ftp y transmisión de video, comparando cantidad de usuarios conectados con la tasa de transmisión de datos recibidos.

Por último, se comparan los resultados, se concluye con el cumplimiento de los objetivos y se realizan unas recomendaciones. Es importante aclarar, que todas las simulaciones se desarrollan en escenarios típicos de una celda, empleando la frecuencia de 700 MHz y específicamente la simulación de LTE se realiza en el enlace de bajada y no es complementada con la técnica de radio MIMO.

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías LTE y WRAN se pueden emplear como complemento del Proyecto de Conectividad de Alta Velocidad del Plan Vive Digital elaborado por el MinTIC, el cual busca brindar acceso de banda ancha a poblaciones que por su ubicación geográfica no fueron beneficiados por el Proyecto Nacional de Fibra Óptica, buscando combatir la pobreza, la inequidad y la generación de empleo.

El departamento del Chocó tiene grandes problemas de infraestructura, desarrollo social y económico, debido a sus condiciones geográficas y climáticas adversas, manifestado en un atraso económico y bajo nivel educativo. Problemáticas que para ser solucionadas requieren bastante tiempo, compromiso político y presupuesto, por lo que el acceso a la banda ancha es una herramienta que brinda soluciones con inmediatez a sus pobladores, beneficiándolos en materia de educación, justicia, salud, equidad, generando oportunidades económicas y ayudando a la construcción de paz.

Al conocer las bondades del acceso de banda ancha para los ciudadanos, para las empresas, para el gobierno, y su influencia en la economía incrementando el Producto Interno Bruto de un país, nace el interés por simular estas tecnologías en regiones rurales de Colombia.

Este trabajo se desarrolla en cinco capítulos y está basado en una metodología cualitativa, que incluye etapas exploratoria, analítica y propositiva.

La primera parte define la banda ancha y los entes gubernamentales involucrados en Colombia, la importancia de su implementación para la sociedad, las empresas y el gobierno junto al impacto económico que tiene en cada país, las políticas nacionales y las tendencias internacionales. Se describe también el proyecto Nacional de Conectividad de Alta Velocidad como marco para la escogencia de los municipios donde se implementarán las simulaciones. Estos municipios son Acandí en el Caribe, Nuquí en el pacífico y Ungía, que se caracterizan por contar con bajos presupuestos, no estar conectados a la red vial nacional ni al sistema de Interconexión Nacional de Energía eléctrica. Adicionalmente, se emplea la herramienta virtual de consulta “Espectro en Línea” de la Agencia Nacional del Espectro ANE, para identificar las frecuencias que se usan en estos municipios.

El tercer capítulo describe el estándar IEEE 802.22, sus principios como la radio cognitiva, la modulación adaptativa, unión de canales, arquitectura, componentes, protocolos y demás conceptos básicos para el entendimiento de la tecnología.

El cuarto capítulo describe la tecnología LTE, sus principales características, arquitectura, componentes, protocolos, técnicas de modulación entre otros para facilitar su comprensión.

En el quinto capítulo toca el tema de las simulaciones, inicialmente plantea el problema para conseguir el software que simule las dos tecnologías, luego describe la solución que es simular dos escenarios independientes el primero es la

cobertura con el software libre Radio Mobile y el segundo es la red simulada con el software OMNET ++ que tiene licencia libre para educación.

El sexto capítulo muestra los resultados obtenidos de las simulaciones con los dos software y luego compara los resultados de las dos tecnologías.

Y finalmente se exponen unas conclusiones que evidencian las ventajas o desventajas de las dos tecnologías en escenarios con diferentes necesidades.

1. LA BANDA ANCHA

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) es el organismo especializado de las Naciones Unidas para las Tecnologías de la Información y la Comunicación – TIC, y define a la Banda Ancha como conexión permanente de alta velocidad proporcionada por un amplio espectro de tecnologías que permiten el acceso a Internet y a otros servicios digitales¹. Esta definición es amplia y quien realmente la regula es cada país.

Según el Grupo de Análisis y Prospectiva del Sector de Telecomunicaciones (Gaptel) de España, “la Banda ancha es un concepto relativo que evoluciona en el tiempo hacia demandas de mayor velocidad, y que varían significativamente de país a país”.

Definir la Banda Ancha es complejo, ya que las velocidades de acceso crecen con el paso del tiempo, por lo que la recomendación E-800 de la UIT habla de “Calidad del servicio” (QoS) como “el efecto conjunto del rendimiento del servicio que determina el grado de satisfacción del usuario de dicho servicio”², de esta forma se incluye la valoración de disponibilidad y la velocidad.

Colombia ha regulado la banda ancha como una “capacidad de transmisión” en la Resolución CRC 2352 – 2010 y, a través, de la resolución 3067 de 2011 define la banda ancha como la capacidad de transmisión cuyo ancho de banda es suficiente para permitir de manera combinada, la provisión de voz, datos y video, ya sea de manera alámbrica o inalámbrica. Para efectos de la comercialización, debe tenerse en cuenta que una conexión será considerada de “Banda Ancha” sólo si las velocidades efectivas de acceso cumplen los siguientes valores mínimos: Sentido de la conexión Velocidad Efectiva Mínima ISP hacia usuario o “Downstream” 1024 Kbps Usuario hacia ISP o “Upstream” 512 Kbps. En el caso de los accesos satelitales la relación Downstream/Upstream es de 1024 Kbps / 256 Kbps.

1.1 IMPORTANCIA DE LA BANDA ANCHA

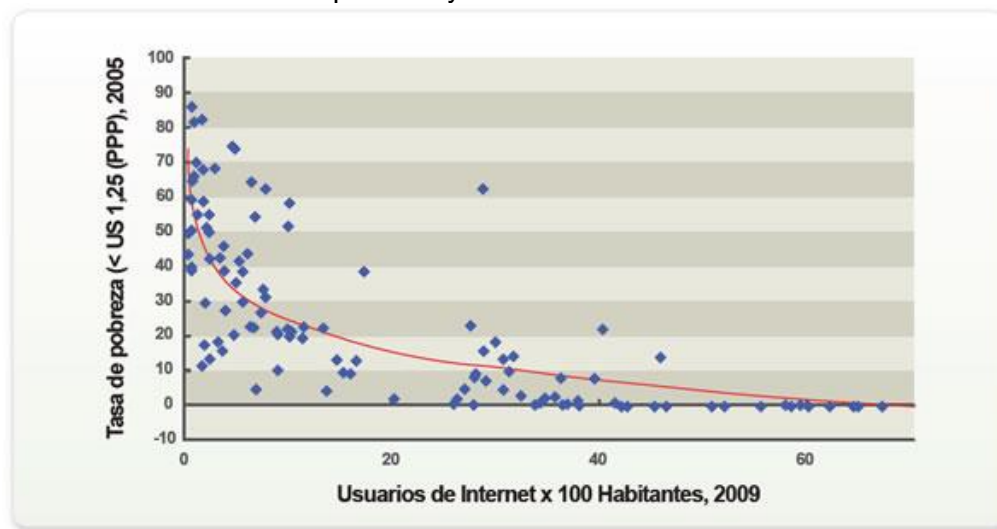
En la actualidad la banda ancha ha tomado protagonismo por facilitar el desarrollo de un país, la sociedad y su economía, brindando ventajas competitivas a las empresas y bienestar en los hogares. No solo es mayor velocidad en la navegación si no la aparición de nuevos servicios a menor costo.

¹UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES UIT. Banda Ancha en los países Andinos: tecnología, regulación y mercado – Análisis de situación y perspectivas 2015. Ginebra: ITU, 2014. 276 p.

²UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES. Recomendación UIT-T E.800: Calidad de los servicios de telecomunicación. Ginebra: 2009. 28 p.

La masificación de la banda ancha en los diferentes países del mundo ha mostrado beneficios de diferente índole. En el estudio realizado por las Naciones Unidas³ se observa una relación entre el número de usuarios de internet y la tasa de pobreza de los Países (ver ilustración 1).

Ilustración 1. Correlación entre pobreza y usuarios de internet 2010



Fuente: Informe de economía creativa 2010 Unctad

Evidenciando, que la banda ancha es un motor de desarrollo económico y los países que han masificado estas redes tienen un mayor crecimiento. Por otra parte, el estudio del banco mundial⁴ muestra que el aumento de cobertura en un 10% aumenta hasta un 1,38% el Producto Interno Bruto en países de bajos y medianos ingresos (ver ilustración 2).

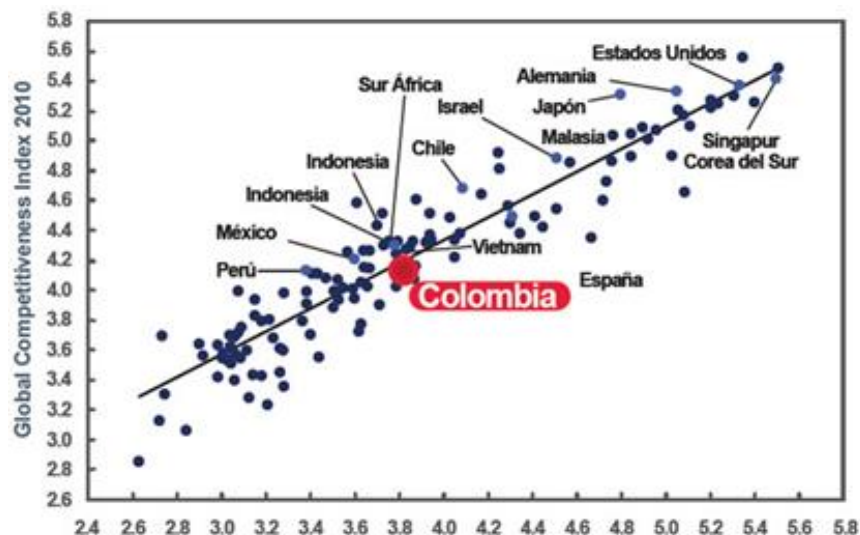
Estos estudios evidencian que al aumentar la cobertura de internet y ofrecer un ancho de banda de mayor capacidad, se contribuye a la creación de empleo y la población accede a nuevos servicios, como la telemedicina, el comercio electrónico y la educación en línea. En el sector Gubernamental facilita, las políticas de gobierno en línea y de transparencia, mejorando la interacción con los ciudadanos, generando oportunidades de progreso y estableciendo un medio para consolidar la presencia del Estado. A nivel empresarial, se facilitan las exportaciones, reduciendo el exceso de inventario, optimizando la cadena de suministros, aumentando las empresas prestadoras de servicios, e implementando nuevas tecnologías. Beneficiando al consumidor no solo, con precio o calidad sino

³UNCTAD, United Nations Conference on Trade and Development Information Economy Report [En Línea] Mar. 2010. p.74. [Citado 15-Mayo-2015]. Disponible en: www.unctad.org/en/Docs/ier_2010_en.pdf

⁴ World Economic Forum. The Global Information Technology Report 2009 - 2010. [En Línea] P 11. [Citado 15-Mayo-2015]. Disponible en: www3.weforum.org/docs/WEF_GITR_Report_2010.pdf

con información eficiente, mayor oferta, diferentes formas de pago y servicio posventa.

Ilustración 2. Índice de competitividad 2010



Fuente: The Global Information Technology Report 2009 - 2010

1.2 POLÍTICAS NACIONALES

Para hablar de políticas nacionales, inicialmente, la Ley 19 de 1958 creó el Consejo Nacional de Política Económica y Social, CONPES, quien “es la máxima autoridad nacional de planeación y se desempeña como organismo asesor del Gobierno en todos los aspectos relacionados con el desarrollo económico y social del país. Para lograrlo, coordina y orienta a los organismos encargados de la dirección económica y social en el Gobierno, a través del estudio y aprobación de documentos sobre el desarrollo de políticas generales que son presentados en sesión.”⁵

El CONPES 3769 del 16 de Septiembre de 2013 declaró la importancia estratégica los proyectos “ampliación del Programa de Telecomunicaciones Sociales e implementación de 800 Tecno-centros” hasta el año 2023.

Una de las estrategias de implementación se adelanta a través del Proyecto Nacional de Conectividad de Alta Velocidad. Las iniciativas aprobadas por el CONPES buscan generar un impacto en el desarrollo de las regiones y alcanzar una cobertura del 100 por ciento del territorio nacional en servicios TIC.

A continuación, en la tabla 1 se relacionan históricamente los CONPES que tratan el tema de Conectividad en el País.

⁵ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, DNP. Documentos CONPES, [En Línea], [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet. <https://www.dnp.gov.co/CONPES/Paginas/conpes.aspx>

Tabla 1. Consejo Nacional de Política Económica y Social

CONPES	OBJETIVOS
3032 de 1999 "Compartel de Telefonía Social"	Facilitar el Acceso Universal de los colombianos a los servicios de telecomunicaciones en todo el territorio nacional. Proveer servicios de telecomunicaciones comunitarias al mayor número posible de localidades, que no cuentan con acceso a estos servicios, logrando el cubrimiento nacional de los mismos. Facilitar el acceso de las minorías étnicas y de la población discapacitada del país a los servicios de telecomunicaciones.
3072 de 2000 "Agenda de Conectividad"	Fomentar el uso de las TIC, para brindar un acceso equitativo a oportunidades de educación, trabajo, justicia, cultura, recreación, entre otros. Fomentar el uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación como soporte del crecimiento y aumento de la competitividad, el acceso a mercados para el sector productivo, y como refuerzo a la política de generación de empleo. Proveer al Estado la conectividad que facilite la gestión de los organismos gubernamentales y apoye la función de servicio al ciudadano.
3171 del 2002 "Políticas de telecomunicaciones sociales 2002-2003"	El Gobierno Nacional presentó nuevos lineamientos para avanzar en la reducción de la brecha de acceso y universalización de los servicios de telecomunicaciones.
3457 de 2007 Reformular el Programa Compartel de Telecomunicaciones Sociales	Acorde con la visión de la Cumbre Mundial de la Sociedad de la Información (Ginebra-2003 y Túnez-2005) en la que los países miembros de la Unión Internacional de la Telecomunicaciones - UIT-, entre ellos Colombia, establecieron la visión general para la construcción de una sociedad centrada en el ciudadano, de amplia inclusión y motor de desarrollo socioeconómico, en la que las TICs permitan combatir el hambre, la pobreza, el analfabetismo y las desigualdades sociales.
3769 del 16 de 2013 "Ampliación Programa de Telecomunicaciones Sociales e implementación de 800 tecno-centros Nacionales"	Declarar de importancia estratégica los proyectos "Ampliación Programa de Telecomunicaciones Sociales" e "Implementación 800 Tecno-centros Nacionales" a través de los cuales se desarrollan las iniciativas "Proyecto Nacional Conectividad de Alta Velocidad – PNCAV" y "Proyecto de Acceso Universal a las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en zonas rurales y apartadas – Kioscos Vive Digital".

Fuente: Departamento Nacional de Planeación

La Ley 1341 de 2009 o Ley TIC, establece "la política de Estado que involucra a todos los sectores y niveles de la administración pública y de la sociedad, para contribuir al desarrollo educativo, cultural, económico, social y político e

incrementar la productividad, la competitividad, el respeto a los Derechos Humanos y la inclusión social”. En el Artículo 2 “El Estado desarrollará programas para que la población de los estratos menos favorecidos y la población rural tengan acceso y puedan utilizar las plataformas de comunicación, en especial de Internet y contenidos informáticos y de educación integral” y en su Artículo 10 “HABILITACIÓN GENERAL. La provisión de redes y servicios de telecomunicaciones, que es un servicio público bajo la titularidad del Estado, se habilita de manera general y causará una contraprestación periódica a favor del Fondo de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Esta habilitación comprende, a su vez, la autorización para la instalación, ampliación, modificación, operación y explotación de redes de telecomunicaciones, se suministren o no al público”.

Esta Ley, también hace referencia a los aportes de las empresas de telefonía fija al FONTIC Fondo de las Tecnologías de la Información y la Comunicación, otorgando un periodo de transición de 5 años (Art 69), en ese periodo, los operadores invertirán en proyectos de banda ancha sobre sus redes a estratos 1 y 2, luego de ese periodo se continuá aplicando el esquema de subsidios que establece la Ley 142 de 1994.

Por otra parte, el MinTIC en el Plan Vive Digital “impulsa el salto tecnológico a través de la masificación del uso Internet con el fin de reducir la pobreza y generar empleo. Para lograrlo el plan promueve el ecosistema digital del país, que está conformado por 4 grandes componentes: Infraestructura, Servicios, Aplicaciones y Usuarios”⁶.

1.2.1 Entes Gubernamentales

Cada país regula el sector TIC de forma independiente, a continuación, se describen las organizaciones estatales que hacen parte del sector en Colombia. El principal ente rector es el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), anteriormente llamado Ministerio de Comunicaciones, según la Ley 1341 o Ley TIC, Es la entidad encargada de diseñar, adoptar y promover las políticas, planes, programas y proyectos del sector de las tecnologías de la información y las comunicaciones. Tiene como función facilitar el acceso y beneficios a todos los habitantes del territorio nacional de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones⁷.

El Decreto 2618 del 17 de diciembre de 2012, modifico la estructura del MinTIC y Creo la Dirección de Conectividad, la cual entre sus funciones esta ”proponer y

⁶ MinTIC: Ecosistema Digital, [En Línea], 2014 - [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet. <http://www.mintic.gov.co/portal/vivedigital/612/w3-propertyvalue-634.html>

⁷ CONGRESO DE COLOMBIA: Ley 1341 de 2009, [En Línea], 2009 - [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet. http://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-3707_documento.pdf

establecer proyectos y programas para ofrecer una moderna infraestructura de conectividad y de comunicaciones, en apoyo a los centros de producción de pensamiento, investigación, desarrollo e innovación de comunicaciones, así como el acompañamiento de expertos en la utilización de las Tecnologías de Comunicación, capaces de dirigir y orientar su aplicación de manera estratégica. Además, efectuar investigaciones al interior de la comunidad con el fin de establecer mecanismos que permitan el acceso y servicio universal a las comunicaciones, con base en indicadores tales como infraestructura de información, infraestructura computacional e infraestructura social. ”

De acuerdo con la Ley 1341 de 2009 la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC), es el órgano encargado de promover la competencia, regular los mercados de las redes y los servicios de comunicaciones.

Según el decreto 4169 del 2011, la Agencia Nacional del Espectro (ANE) es una Unidad Administrativa Especial del orden nacional, con personería jurídica, adscrita al MINTIC. El objetivo de la ANE es brindar el soporte técnico para la gestión, planeación, vigilancia y control del espectro radioeléctrico. Entre sus principales funciones están: “Asesorar al MINTIC y la Autoridad Nacional de Televisión (ANTV) para la planeación eficiente del espectro radioeléctrico (ERE)”.

La Autoridad Nacional de Televisión (ANTV), es creada por la ley 1507 de 2012 y tiene como objetivo brindar las herramientas para la ejecución de los planes y programas, que tienen competencia con la prestación del servicio público de televisión, que buscan garantizar el pluralismo e imparcialidad informativa y que promueven la eficiencia en la prestación del servicio.

La Superintendencia de Industria y Comercio, pertenece al Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (MinCIT), quien se encarga de velar por la protección de los derechos de los usuarios TIC, relacionados con los servicios de comunicaciones y propende por la aplicación de los principios de favorabilidad, calidad, libertad de elección, buena fe, protección de datos personales.

El Fondo de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (FONTIC) es una Unidad Administrativa Especial del orden nacional, dotado de personería jurídica y patrimonio propio, adscrita al Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, se creó el 19 de agosto de 1990. Su objetivo es financiar los planes, programas y proyectos para facilitar prioritariamente el acceso a las Tecnologías de la Información, a todos los habitantes del territorio nacional, así como, apoyar las actividades del Ministerio y la Agencia Nacional del Espectro⁸.

⁸ MinTIC. 25 años de gestión del FONTIC, [En Línea], 19 de Agosto de 2015 - [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet. http://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-3707_documento.pdf
<http://www.mintic.gov.co/portal/604/w3-article-12755.html>

1.3 TENDENCIAS INTERNACIONALES

La UNESCO en asocio con la UIT el año 2010 crearon “la Comisión de Banda Ancha para el Desarrollo Digital”, cuyo propósito es desarrollar estrategias destinadas a acelerar la difusión de la banda ancha en todo el mundo y examinar aplicaciones, buscando mejorar la prestación de servicios sociales, como la salud, la educación, la gestión ambiental y la seguridad entre otros⁹.

En su informe de estado de la banda ancha 2015 “La banda ancha, fundamento del desarrollo sostenible” lanzado el 21 de septiembre de 2015, en la sección que habla de políticas de banda ancha concluye:

“Todavía queda cierto margen de crecimiento del número de países que tienen planes nacionales de banda ancha, con 148 países que habían adoptado un Plan o una estrategia nacional a mediados de 2015, y otros seis países que proyectaban adoptar un Plan. Quedan en total 42 países que todavía no tienen ningún Plan de ningún tipo.” En esta parte, se habla que más de 90 países han establecido en sus políticas la banda ancha como un servicio universal (en Suramérica países como Brasil y Perú), el caso excepcional es Finlandia que en el 2010 declaró por Ley, la banda ancha como un derecho, donde toda persona tiene derecho a tener acceso a conexión a Internet de 10 Mbit/s.

Continúa diciendo, “Es probable que los futuros usuarios de Internet procedan de estratos sociales menos educados y urbanos y hablen idiomas y dialectos distintos del puñado de idiomas que dominan actualmente los servicios y contenidos en línea (entre otros, chino, inglés, español, francés y ruso). La gran mayoría de los idiomas no tienen una presencia significativa en línea que corresponda al número real de hablantes en el mundo.” Este punto se ve como un obstáculo, por no existir contenido en el idioma para estos nuevos usuarios, por lo que el informe resalta la importancia de promover la diversidad cultural y el plurilingüismo en el “mundo cibernético”.

También, dice que “los nuevos avances de la tecnología de satélite facilitan de manera fundamental la instalación de la banda ancha en zonas rurales y aisladas (incluso en países desarrollados). Los satélites ofrecen la ventaja de una gran cobertura en zonas muy extensas, que permite conectar a muchos abonados de manera relativamente rentable, y de una instalación más rápida que una red de conexiones de punto a punto. También permiten obviar los problemas que plantean orografías escabrosas en regiones difíciles de conectar, como zonas montañosas”. Esta es la base del proyecto de Conectividad de Alta Velocidad para la Orinoquía, Amazonía y el Chocó que beneficiara a 441.000¹⁰ personas ubicadas en las selvas Colombianas.

⁹ BROADBAND COMMISSION. Información general, [En Línea], 2011 - [Citado 21-Septiembre-2015]. Disponible en internet. <http://www.broadbandcommission.org/about/Pages/default.aspx>

¹⁰ MinTIC. Plan Vive Digital: Infraestructura, [En Línea], 2014 - [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet. <http://www.mintic.gov.co/portal/vivedigital/612/w3-propertyvalue-7240.html>

Además, destaca que “la Internet de las Cosas’ (IoT) está creciendo rápidamente y Deloitte predice que en 2015 se comercializarán 1 000 millones de dispositivos IoT, 60% más que en 2014. La UIT espera 25.000 millones de dispositivos conectados en red en 2020, lo que significa que los dispositivos conectados serán seis veces más numerosos que las personas conectadas. Para cada persona que se conecte a Internet durante los próximos cinco años, se conectarán 10 veces más dispositivos. De hecho, algunos observadores del sector temen que la Internet de las Cosas pueda abrir una nueva brecha digital en el acceso y la utilización de dispositivos conectados”.

1.4 PROYECTO DE CONECTIVIDAD DE ALTA VELOCIDAD

Según el Plan Vive Digital, el Proyecto Nacional de Conectividad de Alta Velocidad PNCAV, tiene por objeto desplegar las Redes de Transporte de Alta Velocidad, para alcanzar una cobertura del 100% de cabeceras municipales con acceso a Internet, bajo unas características técnicas, económicas y logísticas viables para atender la demanda actual y proyectada de telecomunicaciones a corto, mediano y largo plazo (diez años) de las regiones objeto del proyecto. Brindando cobertura a 27 municipios y 20 áreas no municipalizadas, cuya extensión alcanza el 62% del territorio nacional. Beneficiando a las regiones de la Amazonia, Orinoquia y el departamento de Chocó, favoreciendo a una población de 441.000¹¹ personas ubicadas en las selvas Colombianas.

El proyecto incluye estrategias que facilitan la apropiación de las tecnologías por parte de la población que habita en las zonas de influencia.

El contrato para ejecutar el proyecto se firmó entre el FONTIC y la Unión Temporal Anditel (Anditel S.A.S, Furel S.A, Eléctricas de Medellín – Comercial S.A.), por un valor de \$ 373.992.683.355 pesos y se firmó el 27 de diciembre de 2013.

Según el contrato, en el área técnica Anditel debe garantizar lo siguiente:

Cada municipio o corregimiento departamental debe tener una capacidad total (no agregada) descrita así:

- Para las Ciudades Capitales: capacidad Full Duplex (no agregada) requerida mínima será de 4 STM-1 (620 Mbps).
- Para los municipios restantes se requiere una capacidad Full Duplex (no agregada) requerida mínima será de 1 STM-1 (155 Mbps).

Estas capacidades son mínimas, el proponente deberá prever el crecimiento y la atención a la demanda de servicios durante la vigencia de servicios.

¹¹ MinTIC. Infraestructura, [En Línea], 2014 - [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet. <http://www.mintic.gov.co/portal/vivedigital/612/w3-propertyvalue-7240.html>

Al cabo de cinco años de operación y si la demanda de servicios y capacidad lo ha demandado, la capacidad será de 1 Gbps en cada uno de los 27 municipios, por lo que esta capacidad adicional se podrá distribuir entre los diferentes puntos de la red que necesiten aumentar su capacidad, reconfigurando su red hasta llegar a la capacidad de 47 Gbps. Proveer capacidad de canal de Internet de 10 Mbps con asimetría downlink / uplink de 2 a 1 y reuso de 1 a 4, para cada uno de los Kioscos Vive Digital KVD.

Proveer capacidad dedicada de canal de internet de 10 Mbps para cada Hots Spot de las zonas WiFi, donde se requiere la implementación del servicio de iluminación WiFi con acceso libre y gratuito a cada uno de los 47 sitios. Con cobertura de 200 metros de radio, el tipo de modulación mínimo requerido es MIMO y la concurrencia es de hasta 200 usuarios por cada punto de acceso.

1.4.1 Municipios

El PNCAV se está desarrollando en 27 cabeceras municipales y 20 áreas no municipalizadas de los departamentos de Amazonas, Antioquia, Arauca, Caquetá, Casanare, Chocó, Guainía, Guaviare, Meta, Putumayo, Vaupés y Vichada, que no fueron beneficiados por el Proyecto Nacional de Fibra Óptica. De los 27 municipios, 11 pertenecen al Departamento del Chocó se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Municipios Beneficiados por el PNCAV del Departamento del Chocó

Departamento del Chocó	
Municipio	Población (habitantes)
Acandí	9842
Alto Baudó	34117
Bahía Solano	9255
Bajo Baudó	17086
Bojaya	10047
El Litoral del San Juan	14268
Juradó	3407
Medio Atrato	26696
Nuquí	8275
Sipí	3869
Unguía	14973

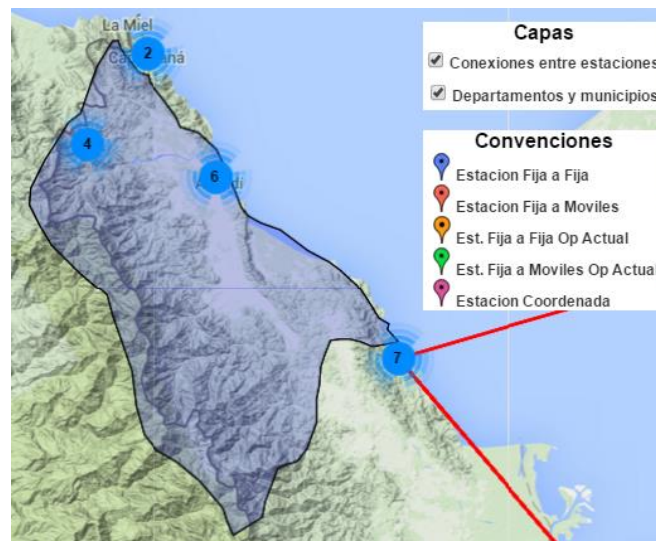
Fuente: Plan Vive Digital

Para la Simulación, se escogieron los municipios de Acandí, Nuquí y Ungía, pertenecientes al departamento del Chocó.

El primero es el municipio de Acandí que tiene una población de 9842¹² habitantes en ocho centros poblados¹³ (Capurganá, La Caleta, San Francisco, Chagandí, Sapzurro, Peñalosa, Titiza), al norte y al occidente limita con la Republica de Panamá, al oriente con el mar caribe y al sur con el municipio de Unguía, no está integrado a la Red Vial Nacional, solo se puede llegar por mar o por avión (aeropuerto Alcides Fernández), tiene una Temperatura media 28° C y la altitud de la cabecera municipal es de 0 m.

Según el sistema de consulta del espectro en línea de la ANE (Agencia Nacional de Espectro), cuenta con 19 estaciones que están activas en la zona 17 Frecuencias y hace parte de 2 radioenlaces (Bogotá – Acandí y Acandí – Necoclí).

Ilustración 3. Mapa del municipio de Acandí



Fuente: ANE, Espectro en Línea

El segundo municipio es el de Nuquí que cuenta con una población de 8275¹⁴ habitantes, en nueve centros poblados¹⁵ (Arusí, Coquí, Jurubirá, Panguí, Tribugá,

¹² Alcaldía de Acandí. Nuestro Municipio: Indicadores, [En línea]. Agosto de 2013 [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet: <http://www.acandi-choco.gov.co/index.shtml#3>

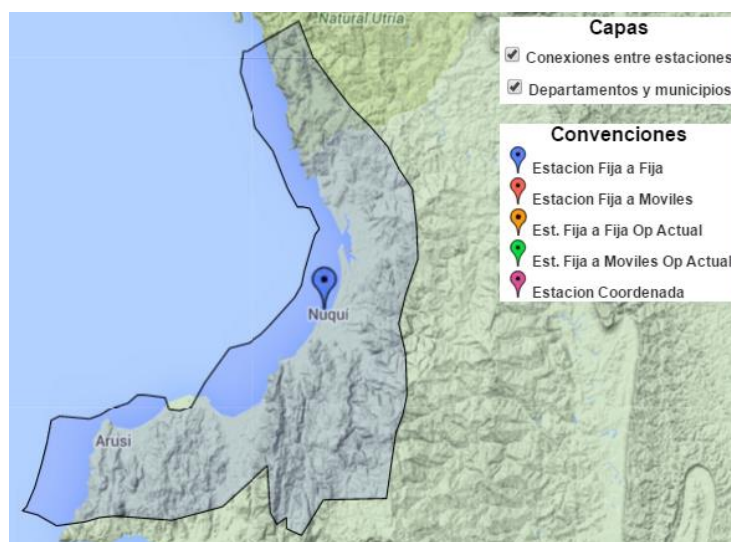
¹³ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA DANE: Codificación de la División Político – Administrativa de Colombia (DIVIPOLA), [En línea]. 2015 [Citado 22-Septiembre-2015] Disponible en internet: <http://geoportal.dane.gov.co:8084/Divipola/>

¹⁴ Alcaldía de Nuquí. Nuestro Municipio: Información general, [En línea]. Septiembre de 2012 [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet: <http://www.nuqui-choco.gov.co/index.shtml#3>

Apartadó, Jobí, Termales), limita al norte con el municipio de Bahía Solano, Al sur con el municipio Bajo Baudó, Al Oriente con el municipio Alto Baudó, Al occidente con el Océano Pacífico. No está integrado a la Red Vial Nacional (Vía panamericana en construcción), solo se puede llegar por mar o por avión (aeropuerto Reyes Murillo), tiene una Temperatura media 28° C y la altitud de la cabecera municipal es de 5 metros.

Según el sistema de consulta del espectro en línea de la ANE (Agencia Nacional de Espectro), cuenta con 2 estaciones y 2 frecuencias.

Ilustración 4. Mapa del municipio de Nuquí



Fuente: ANE, Espectro en Línea

El tercer municipio es Ungüía que cuenta con una población de 14973¹⁶ habitantes, en 14 centros poblados¹⁷ (Balboa, Gilgal, Santamaría del Darién, Tanela, Titumate, Betecito, Marriaga, Tumaradó, Cuque Peniel, El Puerto, El Roto, Quebrada Bonita, Ticole de Isla), limita al norte con el municipio de Acandí, al oriente con el golfo de Urabá, al sur con el municipio de Río Sucio y al occidente con la República de Panamá. No está integrado a la Red Vial Nacional, solo se

¹⁵ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA DANE: Codificación de la División Político – Administrativa de Colombia (DIVIPOLA), [En línea]. 2015 [Citado 22-Septiembre-2015] Disponible en internet: <http://geoportal.dane.gov.co:8084/Divipola/>

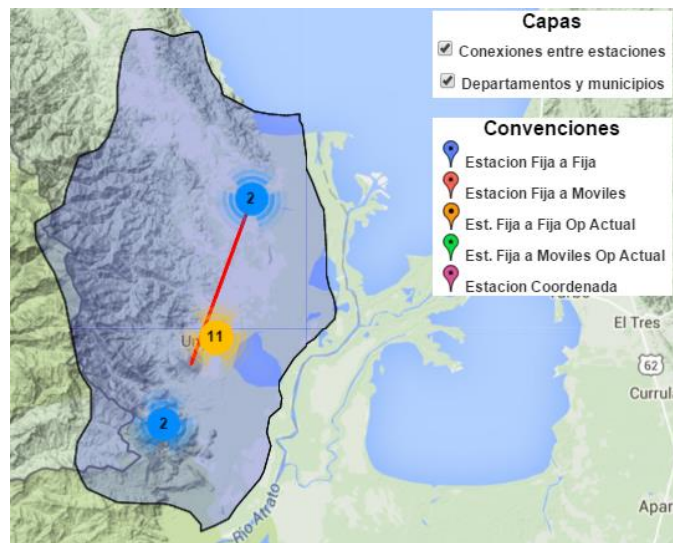
¹⁶ Alcaldía de Ungüía. Nuestro Municipio: Información general, [En línea]. Oct de 2012 [Citado 20-Sep-2015]. Disponible en internet: <http://www.unguia-choco.gov.co/index.shtml#5>

¹⁷ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA DANE: Codificación de la División Político – Administrativa de Colombia (DIVIPOLA), [En línea]. 2015 [Citado 22-Septiembre-2015] Disponible en internet: <http://geoportal.dane.gov.co:8086/Divipola/>

puede llegar por vía fluvial desde Turbo Antioquia o por el río Atrato, tiene una Temperatura media 28° C y la altitud de la cabecera municipal es de 5 metros.

Según el sistema de consulta del espectro en línea de la ANE (Agencia Nacional de Espectro), cuenta con 15 estaciones, 15 Frecuencias y 51 coberturas.

Ilustración 5. Mapa del municipio de Ungía



Fuente: ANE, Espectro en Línea

2. RED INALÁMBRICA DE ÁREA REGIONAL

La WRAN por sus siglas en ingles Wireless Regional Area Network o Red Inalámbrica de Área Regional, es un estándar propuesto por la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) y está basado en la radio inteligente y adaptable llamada radio cognitiva. La cual aprovecha las frecuencias no usadas en determinadas ubicaciones geográficas (espacios en blanco) resultantes del “apagón analógico” por implementar la televisión digital. Esta red inalámbrica está diseñada para brindar mayor cobertura de internet a zonas rurales.

2.1 RADIO COGNITIVA

La Radio Cognitiva (RC) es “una tecnología que detecta el espectro no utilizado, crea un canal de comunicación para utilizar este espectro y hacerlo de tal manera que no interfiera con los dispositivos nativos, que son aquellos que tienen licencia (autorizados) para utilizar ese espectro”¹⁸. Los dispositivos con tecnología de RC reconocen su medio ambiente y utilizan los recursos disponibles en frecuencias y ancho de banda, independientemente de la tecnología que ofrezca y use el servicio. Según la FCC (Federal Communications Commission) la radio cognitiva RC “es un sistema de radio que lleva a cabo continuamente la detección del espectro, identifica dinámicamente el espectro no utilizado, operando en esos espacios en blanco, donde los sistemas de radio con licencia (principal) no están en uso.

Las características de la radio cognitiva están basadas en la detección del espectro, la gestión del espectro, la co-existencia, la geo-localización y la seguridad.

La radio cognitiva es la base del estándar 802.22 que se muestra a continuación, y funciona apoyado en la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM).

2.2 ESTÁNDAR IEEE 802.22 WRAN

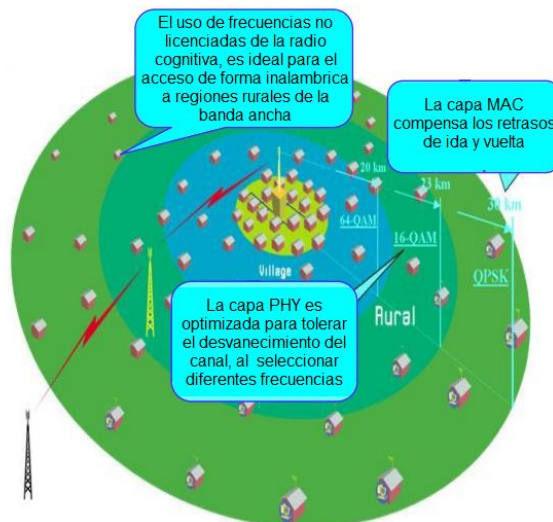
La red inalámbrica de área regional WRAN (Wireless Regional Area Network) comenzó como un grupo de trabajo de ingenieros de la IEEE en 2004, se convirtió en estándar en el año 2009 y se publicó oficialmente en julio del 2011. Consiste

¹⁸ HUIDOBRO, Manuel José. Radio Cognitiva: La radio se vuelve inteligente. [En Línea], Abril 2011 [Citado 20-Sep-2015]. Disponible en: [/www.coitt.es/res/revistas/04d%20Radio%20cognitiva.pdf](http://www.coitt.es/res/revistas/04d%20Radio%20cognitiva.pdf)

en la implementación de funcionalidades de radio cognitiva en la capa física (PHY) y la capa MAC¹⁹.

El estándar IEEE 802.22 tiene como objetivo suministrar a las regiones rurales, menos pobladas, acceso de banda ancha mediante frecuencias liberadas resultantes de reemplazar la televisión analógica por la televisión digital, estas frecuencias en la gama de VHF y UHF presentan características de propagación ideales, no tienen necesidad de línea de vista, brindando mayor cobertura en regiones rurales con baja densidad de población. Al reutilizar las bandas de Televisión VHF (Very High Frequency 30 a 300 Mhz) y UHF (Ultra High Frequency 300 Mhz a 3 GHz), garantiza un amplio alcance a una tasa de transmisión de datos, empleando los espacios vacíos de ambas bandas²⁰.

Ilustración 6. Rangos y Modulaciones del Estándar IEEE 802.22



Fuente: Adaptación del estándar IEEE 802.22

Según el estándar IEEE 802.22 las características técnicas son:

Una tasa de bit de hasta 22 Mbps, área de cobertura de hasta 100 km entre el Equipo Local del Cliente (CPE) y la Estación Base (BS), puede emplear diferentes anchos de banda (6,7 y 8 MHz). El estándar trabaja en la banda de 54 a 862 MHz

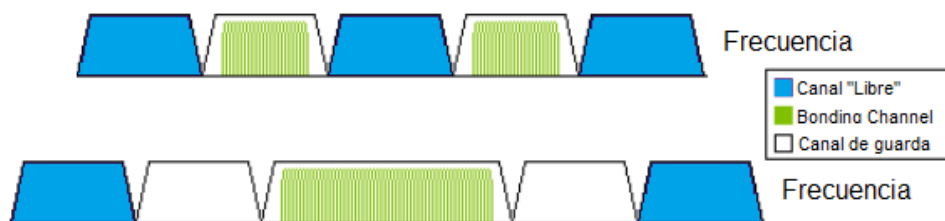
¹⁹PIETROSEMOLI, Ermanno y ZENNARO, Marco. Redes Inalámbricas en los Países en Desarrollo. [En Línea], Jane Butler, 2013 [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en: <http://wndw.net/pdf/wndw3-es/wndw3-es-ebook.pdf>

²⁰ IEEE. STANDARD 802.22-2011: Standard for Information Technology - Telecommunication and Information exchange: Cognitive Wireless RAN Y Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Computer Society, 2011. . [En Línea], 2013,[Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.22b-2015.html>

con modulación OFDMA (con 48 sub-canales) y emplea modulaciones QPSK, 16 QAM y 64 QAM.

Otra característica, es la utilización de la técnica “Bonding Channels”, que se muestra en la ilustración 7 y consiste en emplear simultáneamente varios canales contiguos, logrando unir hasta tres canales. La ventaja de esta técnica es que la señal tiene más probabilidades de multicamino, evitando así los desvanecimientos de la señal. La desventaja de utilizar esta técnica, es la necesidad de un canal de guarda entre los canales Bandung Channel y los canales en uso por otros sistemas.²¹

Ilustración 7. Bonding Channel



Fuente: Elaboración propia, adaptación del Estándar IEEE 802.22

La topología a implementar es punto a multipunto y consta de una estación base BS y varios equipos de usuario CPE. La Estación Base controla al Equipo Local del Cliente, Además, controla el acceso a medios de comunicación y todas las características de transmisión de RF, tales como frecuencias de funcionamiento, de modulación y de codificación.

Para proteger el servicio la BS y el CPE tienen una relación maestro - esclavo, donde cada CPE (esclavo) necesita una autorización de la BS (maestro) para transmitir. El terminal consumidor (CPE) utiliza una antena direccional externa, para transmitir o recibir información²² y adicionalmente, una antena omnidireccional que está censando el espectro para determinar qué frecuencias están disponibles. Esta detección se lleva a cabo en intervalos de tiempo variables.

El estándar IEEE 802.22 permite la movilidad de los usuarios al tener como base la radio cognitiva en su funcionamiento, ya que inicialmente detecta el espectro ocupado, cambiando las características de transmisión para no causar

²¹ STEVENSON, C y CHOUINARD, G. IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard, vol. 47, 1 edición, Janeiro: IEEE Communication Magazine, 2009. p. 130-138.

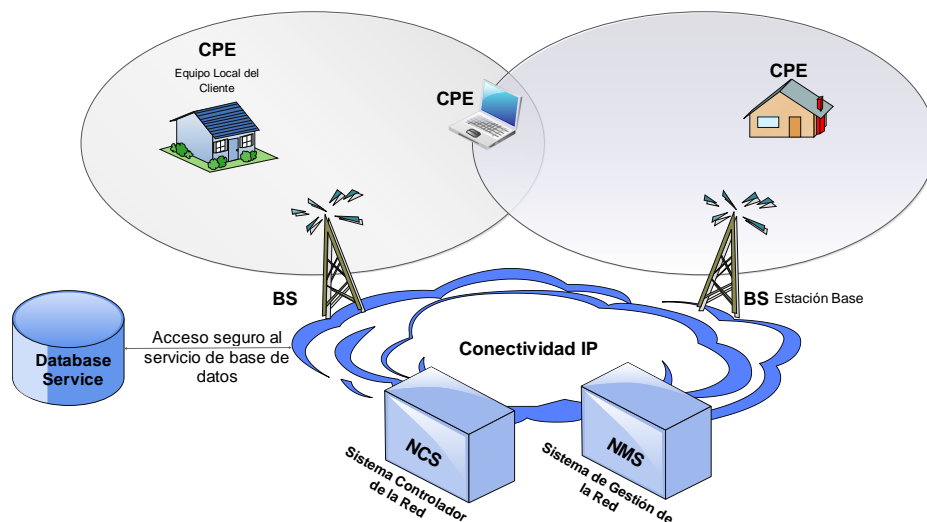
²² MODY, A y CHOUINARD, G. Visión general del estándar IEEE 802.22 en redes de área inalámbrica y tecnologías de base regional, [En Línea], marzo de 2010. [Citado 21-Septiembre-2015] Disponible en: <http://www.ieee802.org/22>

interferencia, permitiendo la movilidad de hasta 114 km/h, sin traspasos (handover), complementado por la antena GPS para determinar su ubicación.

2.2.1 Arquitectura

La arquitectura del estándar IEEE 802.22, se representa en la ilustración 8 y está compuesta por un equipo local de cliente CPE, una estación base (BS), que brinda la cobertura de radio y transmite máximo a 512 terminales²³ y son administrados por un sistema de control de red (NCS) y un sistema de gestión de red (NMS). Además, contiene una base de datos a la que todos los nodos pueden acceder brindando seguridad al sistema. El sistema de control de la red y el sistema de gestión de la red se conectan a través de un modelo de referencia de la red de transporte basado en Protocolo de Internet (IP)²⁴.

Ilustración 8. Arquitectura IEEE 802.22



Fuente: Elaboración propia, adaptación del estándar IEEE 802.22

La conexión inalámbrica se da entre la estación base BS y el equipo local del cliente CPE. Los CPE emplean dos tipos de antenas para lograr esta conexión una omnidireccional y una direccional, que actúa con el sistema de geo-localización.

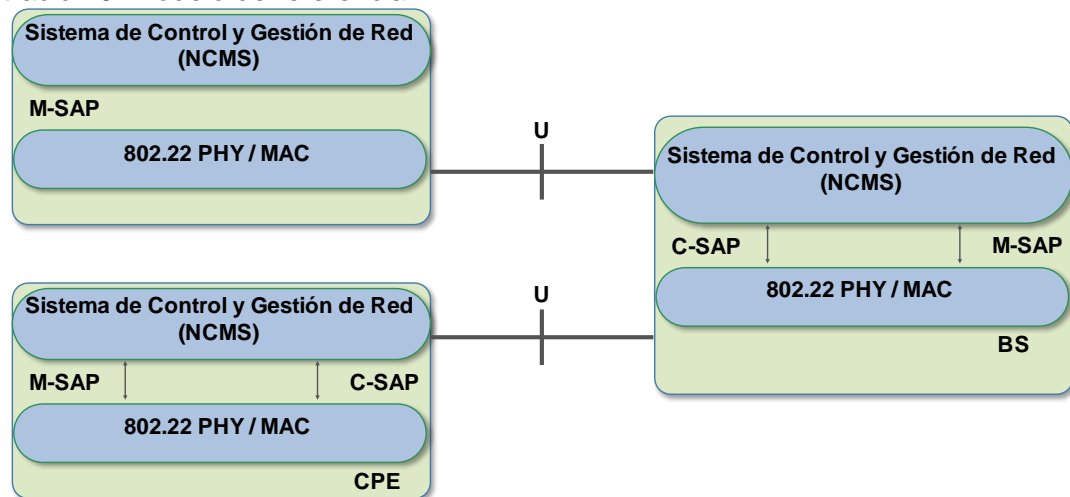
²³ IACOBUCCI, M. Reconfigurable Radio Systems: Network Architectures and Standards. [En Línea], Somerset, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2013 [Citado 25-Septiembre-2015] Disponible en: <http://www.ebrary.com>

²⁴ Ibid., p.154

La siguiente ilustración muestra el modelo de referencia de la red. El equipo local del cliente (CPE), las estaciones base (BS) que se gestionan mediante nodos del sistema de control y del sistema de gestión de la red (NCMS), implementados en el lado de la red y el usuario. Se observa como múltiples CPEs están conectados a una misma estación base (BS).

La CPE se comunica a la BS, a través del estándar de interfaz U. El SNMP es un protocolo de red definido por la IETF (Internet Engineering Task Force), que opera en la capa de aplicación y permite la configuración, gestión y supervisión de los dispositivos conectados a la red.

Ilustración 9. Modelo de referencia



Fuente: Elaboración propia, adaptación del estándar IEEE 802.22

La interfaz entre NCMS y los nodos gestionados se observa en la ilustración 9 y se denominan M-SAP y C-SAP, son los encargados de proporcionar acceso a las funciones del plano de control y al plano de gestión de las capas superiores. M-SAP se emplea para la gestión de primitivas sensibles, como la configuración del sistema, la estática, la detección de informes, geo-ubicación. C-SAP se emplea para el equipo de plano de control, usado como suscriptor y administrador de sesiones, la gestión de seguridad y la gestión de los recursos de radio²⁵.

Para identificar los canales desocupados de las bandas de televisión, y con el fin de no interferir con el usuario titular, la BS implementa características de radio cognitiva como la detección del espectro, la geo-localización, el acceso a una base de datos de geo-localización y la gestión del espectro.

El protocolo que funciona como modelo de referencia PRM²⁶ (Protocol Reference Model) de la BS se muestra en la ilustración 10 y del CPE en la ilustración 11, el

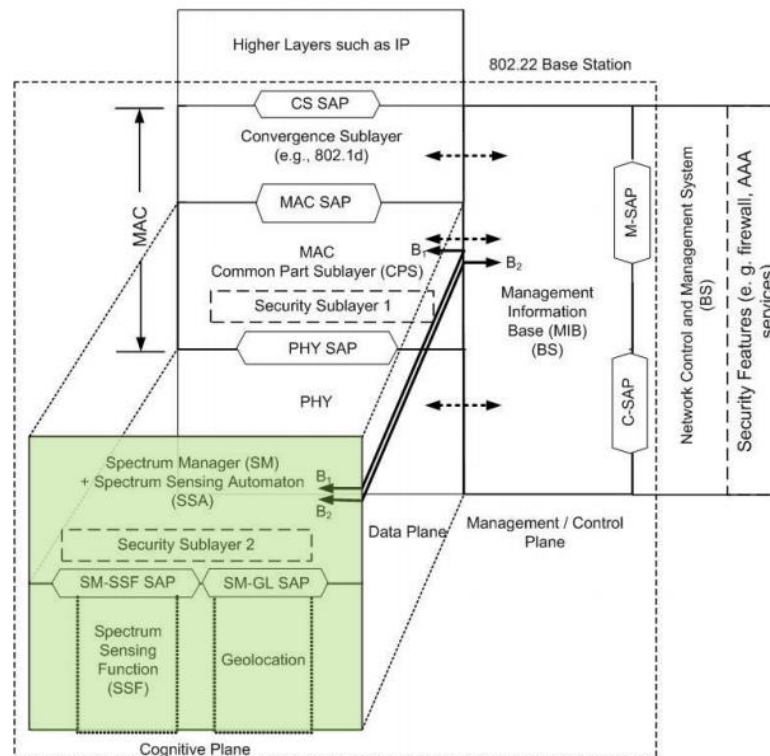
²⁵ IEEE 802.22 Working Group Website, OP.cit., p.10

²⁶ Ibid., p.6

objetivo es separar el plano cognitivo del plano de control y del plano de gestión de los datos.

El estándar IEEE 802.22 proporciona tres mecanismos de protección al titular de la red, y corresponde a la detección, al acceso de la base de datos y a la ubicación. Adicionalmente, el PRM tiene en cuenta la fecha y controla la gestión basado en los principios de la radio cognitiva²⁷.

Ilustración 10. Estación Base BS



Fuente: Estándar IEEE 802.22

El estándar IEEE 802.22 proporciona tres mecanismos de protección al titular de la red, y corresponde a la detección, al acceso de la base de datos y a la ubicación. Adicionalmente, el PRM tiene en cuenta la fecha y controla la gestión basado en los principios de la radio cognitiva²⁸.

El estándar IEEE 802.22 describe los componentes, en la capa física PHY²⁹ y la capa MAC³⁰ en el plano de datos y la subcapa de convergencia. Entre estas capas se incorpora el SAP (Service Acces Points) para implementar la modularización

²⁷ Ibid., p.6

²⁸ Ibid., p.6

²⁹ Ibid., p.8

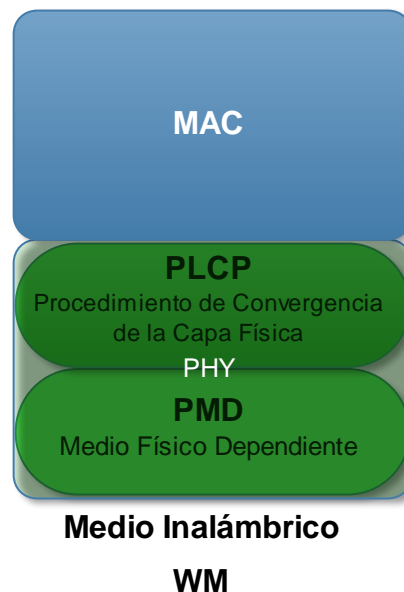
³⁰ Ibid., p.9

La multiplexación OFDMA es una versión multiusuario de la OFDM (multiplexación por división de frecuencias ortogonales), y se usa para que un grupo de usuarios del sistema compartan el espectro, en un determinado canal para aplicaciones de baja velocidad. El acceso múltiple se logra al dividir el canal, en un grupo de sub-portadoras que se reparten a los diferentes usuarios.

Cada símbolo OFDM / OFDMA se divide en sub canales de 28 sub portadoras, de los cuales 4 son símbolos pilotos. Los símbolos piloto se insertan cada 7 sub-portadoras y se emplean para corregir la respuesta del canal³².

La PHY se divide en dos sub-capas, el PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) que es más cercano a la MAC y el PMD (Physical Medium Dependent), que interactúa con el medio inalámbrico (ver ilustración 12).

Ilustración 12. Sub-Capas PHY



Fuente: Elaboración propia

Según el estándar IEEE 802.22, el funcionamiento del transmisor en la capa PHY inicia al enviar los datos binarios de la MAC (control de acceso al medio) a la PHY, estos datos ingresan al procesador de codificación de canal. Después, los datos codificados se asignan a las constelaciones de datos, para los sub-canales mediante la sub-portadora asignada en la técnica OFDM. Técnicamente una trama en su primer símbolo OFDM puede estar ocupada por el preámbulo de la trama o su segundo y tercer símbolo pueden estar ocupados por el preámbulo de la súper-trama y el preámbulo de la trama, ayudando al proceso de sincronización.

³² IACOBUCCI, M. S, Op.cit., p.86

Luego el Flujo de datos resultante de las constelaciones son procesados por la transformada inversa de Fourier para evitar interferencia entre símbolos después de una conversión serie/ paralelo. Para finalizar la señal OFDM mediante un convertidor digital/ analógico es transferido a los módulos de transmisión de RF³³.

La capa PHY al ser la interfaz entre el medio inalámbrico y la MAC tiene tres características esenciales. Estas consisten en Intercambiar las tramas entre la capa PHY y la MAC. Utilizar la señal portadora y la modulación de espectro ensanchado para transmitir tramas a través del medio y proveer a la MAC un indicador para detectar la portadora y señalar la actividad en el medio³⁴

En la capa PHY se encuentra el control de potencia de transmisión, para reducir la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente EIRP (Effective-Isotropic-Radiated-Power) de transmisión en la terminal del cliente CPE. Este control minimiza la interferencia con los operadores de servicios tradicionales y facilita una rápida conexión³⁵.

2.2.1.2 Capa MAC (Medium Access Control)

La capa de Control de Acceso al Medio MAC se caracteriza por estar orientada a la conexión, y por estar basada en la radio cognitivas debe ser flexible y responder rápidamente a cambios en el funcionamiento, previniendo errores en la transmisión y en la interferencia con otros operadores. También, compensa los retardos ocasionados por la distancia entre el CPE y la BS³⁶.

Su arquitectura es compatible con las tipologías de calidad de servicio QoS. La capa es dinámica, y apoyada por la detección del espectro se adapta en periodos de silencio, equilibrando los requisitos de QoS de los usuarios. Además, incluye la subcapa CPS (Sublayer Part Common) y la subcapa de seguridad 1, que proporciona mecanismos para la autenticación, el intercambio de claves, la seguridad y el cifrado. La CPS se basa en una estructura sincrónica de súper-tramas.

La MAC tiene dos modos de operación o estructuras de trama. La primera o modo normal, se puede ver en la ilustración 13 y consiste en una celda que transmite en un canal de TV y emplea la súper-trama marco. La segunda o modo de auto-convivencia (ver ilustración 14), donde más celdas comparten el mismo canal y cada opera solo con una o varias súper-tramas.

³³ IEEE. STANDARD 802.22-2011, Op.cit., p.14

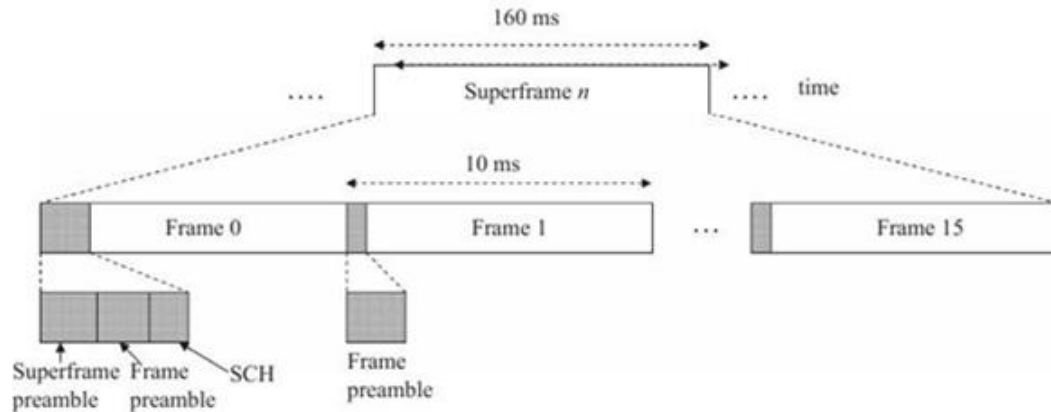
³⁴ JELINEK, Peter. El estándar IEEE-802.22. [En Línea], Universidad Politécnica de Valencia, 2012 [Citado 30-Sep-2015] Disponible en: Internet: http://iba.dit.upm.es/w/images/7/7f/El_estandar_IEEE-802.22.pdf

³⁵ IACOBUCCI, M. S, Op.cit., p.142

³⁶ Ibid., p. 157.

En ambos modos, cada súper-trama en los últimos 160 ms contiene 16 tramas de 10 ms cada uno³⁷. La principal diferencia es que en el modo normal sólo una red inalámbrica transmite la súper-trama marco y en el modo de auto-convivencia la súper-trama se comparte entre diferentes redes inalámbricas.

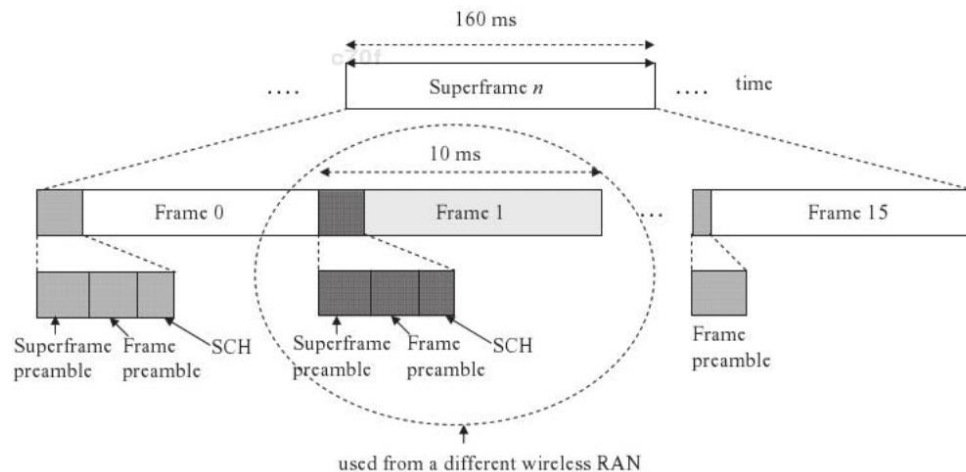
Ilustración 13. Estructura de trama en modo normal (Súper trama Marco)



Fuente: Reconfigurable Radio System Network

La Súper-trama Macro emplea un único protocolo PHY (PDU - Protocolo unidad de datos) y la Súper-trama puede tener varios PDU de diferente CPEs, donde contiene intervalos para el arranque, solicitud de ancho de banda, notificación UCS (situación de convivencia de urgencia), y auto-convivencia (CBP)³⁸.

Ilustración 14. Estructura de trama en modo convivencia (Súper trama)



Fuente: Reconfigurable Radio System Network

³⁷ Ibid., p. 158.

³⁸ Ibid., p. 159

2.2.1.3 Componentes del plano cognitivo

El plano cognitivo incluye detección de espectro (SS), geo-ubicación (GL) en la capa física, el gestor de espectro (SM) y la automatización de detección de espectro (SSA) en la capa MAC.

- **Detección del espectro**

La capa física es quien realiza la detección del espectro. Se realiza desde la CPE para detectar las SBs que se encuentran en el área, para detectar el espectro disponible, luego selecciona el mejor canal disponible y finalmente, lo liberan cuando se detecta un usuario con licencia³⁹.

Ilustración 15. Tipos de Antena del CPE



Fuente: Adaptado del Estándar IEEE 802.22

- **Geo-localización**

La Geo-localización se emplea para identificar la posición de las bandas desocupadas para la transmisión de datos, esta información ayuda a los algoritmos para la gestión del espectro. Esta técnica puede ser por satélite o terrestres⁴⁰.

- **Automatización de detección del espectro**

La automatización de detección del espectro (SSA) se implementa en la capa MAC del CPE y la BS. La SSA interconecta la función de detección de espectro (SSF) y ejecuta las órdenes recibidas por el gestor del espectro (SM)⁴¹.

³⁹ IEEE. STANDARD 802.22-2011, Op.cit., p.5

⁴⁰ Ibid.,p.5

⁴¹ Ibid.,p.5

- **Servicio de base de datos**

El estándar IEEE 802.22 emplea una arquitectura de punto a multipunto de red, donde la estación base (BS) controla los parámetros de radio de sus CPEs asociados. Las BSs se conectan a un servicio de base de datos que contiene información sobre el uso del espectro y los canales disponibles⁴².

- **Gerencia del espectro (SM)**

El gestor del espectro se implementa en la capa MAC de la estación base y es responsable de realizar las tareas de gestión del espectro, como el mantenimiento de la información de disponibilidad del espectro, la selección de los canales y la programación del tiempo para la detección del espectro. Los canales son clasificados según su disponibilidad, de la siguiente forma, “protegido” si el canal está en uso, “sin clasificación” si el canal aún no se ha detectado, “no permitido” si el canal tiene restricciones regulatorias, y en “funcionamiento” cuando el canal está listo para la comunicación entre una BS y CPEs en una celda⁴³.

⁴² Ibid.,p.5

⁴³ Ibid.,p.8

3. LTE (Long Term Evolution)

La tecnología LTE (Evolución a Largo Plazo) es también, llamada de cuarta generación “4G”, fue diseñada por el 3GPP (Third Generation Partnership Project), que es una entidad de normalización de las telecomunicaciones, compuesto por organizaciones de Asia, Estados Unidos y Europa⁴⁴.

3.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE LTE

LTE tiene como principal característica, que todos sus servicios son soportados por el protocolo IP (“all IP”), manejando velocidades en condiciones ideales de hasta 150 Mb/s con una latencia inferior a los 5 ms en una red des congestionada. Además, los teléfonos móviles funcionan en dos estados, el primero es un estado activo de comunicación con la red y el segundo un estado de espera de baja potencia. También, está optimizado para el tamaño de las celdas hasta 100 Km. En cuanto a movilidad, soporta velocidades de hasta 350 Km/h. Por último, LTE está diseñado para trabajar en diferentes anchos de banda, que van desde 1,4 MHz hasta un máximo de 20 MHz.

3.1.1 Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM)

La técnica de transmisión OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) es un mecanismo de transferencia multi-portador que consistente en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un conjunto de sub-portadoras, basado en las propiedades de ortogonalidad de las sub-portadoras, es posible efectuar la transmisión simultánea de todos los símbolos manteniendo la capacidad de separación de los mismos en recepción⁴⁵.

3.1.2 Técnica de múltiple acceso OFDMA y SC-FDMA

El método de acceso múltiple OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) es empleado en el enlace descendente de LTE, debido a que es robusto frente a la interferencia intersímbolo resultante de la propagación multicamino y

⁴⁴ 3GPP. Acerca de 3GPP: Inicio. [En Línea], 2009 [Citado 03-Oct-2015] Disponible en: <http://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp>

⁴⁵ 3GPP. LTE. [En Línea], 2009 [Citado 03-Oct-2015] Disponible en: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>

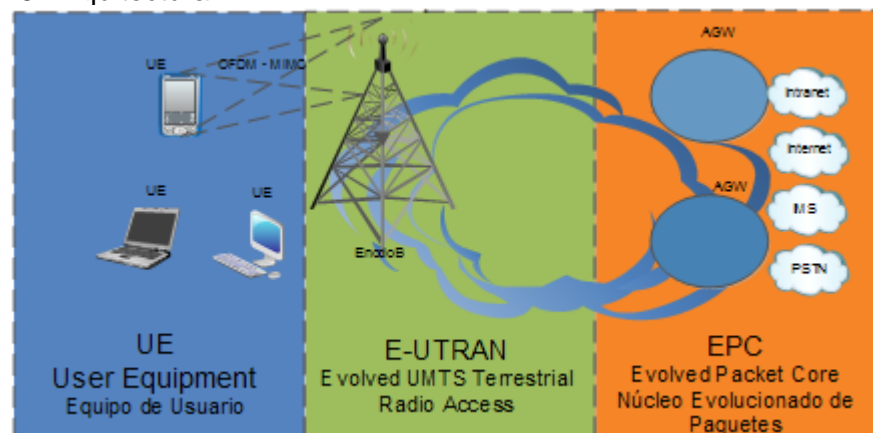
combate la distorsión por medio de técnicas de ecualización en el dominio de la frecuencia⁴⁶.

La técnica de acceso múltiple SC-FDMA es muy similar a OFDM, pero efectuando una pre codificación de los símbolos a transmitir antes del proceso de transmisión OFDM, lo que permite reducir las variaciones en la potencia instantánea⁴⁷.

3.2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE

Según el 3GPP, la arquitectura LTE se denominan EPS (Evolved Packet System) y consta de tres componentes principales, el primero es un equipo de usuario UE, el segundo la red de acceso terrestre llamada E-UTRAN y el tercer componente es la red troncal EPC (Evolved Packet Core) o núcleo de paquetes evolucionado⁴⁸. Todos los componentes que engloban el sistema soportan todo tipo de servicios de telecomunicaciones, mediante mecanismos de conmutación de paquetes, ver ilustración 16.

Ilustración 16. Arquitectura LTE



Fuente: Elaboración propia

Se emplea una red IP como red física para interconectar todos los equipos de la red de transporte, así que adicionalmente se emplean elementos como enrutadores, servidores DHCP, servidores de DNS e interruptores.

El Equipo de Usuario UE, la red de acceso terrestre E-UTRAN y el núcleo de paquetes evolucionado EPC, tienen su arquitectura interna y se muestra a continuación.

⁴⁶ Ibid., p.3

⁴⁷ Ibid., p.4

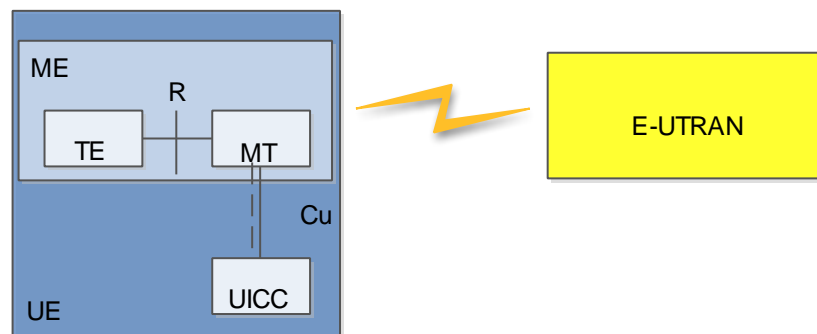
⁴⁸ VODAFONE. COMES, Ramón, ÁLVAREZ, Francisco, ROMERO, Jordi y FERRÚS Ramón. LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles. [En Línea], Fundación Vodafone España, 2010 [Citado 05-Oct-2015] Disponible en: http://www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf

3.2.1 Equipo de Usuario UE

El equipo de usuario es el dispositivo que permite al usuario conectarse con la red LTE, a través de la interfaz de radio y está integrado por dos elementos, el primero es el módulo de subscripción de usuario (SIM/USIM) y el segundo es el terminal móvil ME (Mobile Equipment)⁴⁹, ver ilustración 17. El ME está integrado por dos entidades funcionales, una es la terminación móvil (MT) y la otra el equipo terminal (TE) que se definen a continuación:

- Módulo de subscripción de usuario (UICC): es una tarjeta inteligente, conocida como el módulo de identidad de abonado universal (USIM), se asocia al usuario, identificándolo en la red y es independiente del equipo móvil. La separación entre SIM y ME facilita que un usuario pueda cambiar de terminal sin necesidad de cambiar de identidad⁵⁰. También, lleva acabo cálculos de seguridad.
-
- Equipo móvil (ME): en él se integran las funciones propias de comunicación con la red celular, así como las funciones adicionales que permiten la interacción del usuario con los servicios que ofrece la red⁵¹.
- Terminación móvil (MT): se encarga de las funciones propias de la comunicación, podría ser una tarjeta LTE con plug-in, para conectarse el computador⁵².
-
- Equipo terminal (TE): equipo que se ocupa de la interacción con el usuario.

Ilustración 17. Diseño interior UE



Fuente: Elaboración propia

⁴⁹ Ibid., p. 107

⁵⁰ Ibid., p. 107

⁵¹ Ibid., p. 108

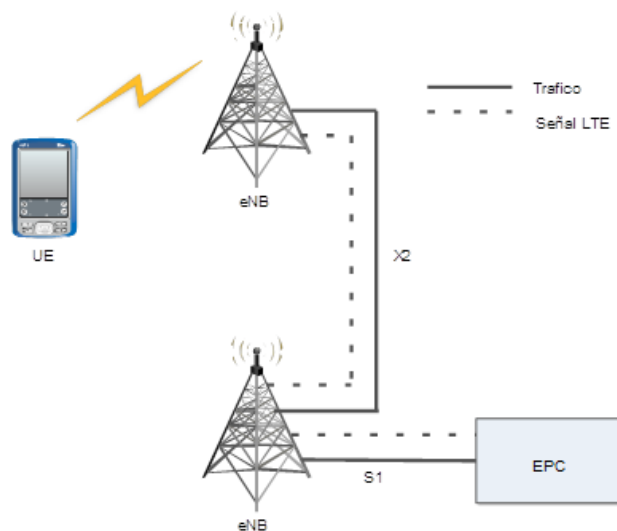
⁵² Ibid., p. 108

Los dispositivos móviles, se identifican por su IMEI (International Mobile Equipment Identity), seguido por el EIR (Equipment Identity Register), con el fin de evitar que dispositivos robados tengan acceso a la red.

3.2.2 Red de Acceso de Radio Terrestre Evolucionada UMTS (E-UTRAN)

La E-UTRAN o Red de Acceso de Radio Terrestre Evolucionada maneja las comunicaciones entre el UE y el núcleo de paquetes evolucionado EPC y está compuesta por el eNB⁵³, se muestra en la ilustración 18.

Ilustración 18. Arquitectura E-UTRAN



Fuente: Elaboración propia

Cada eNB es una estación base dentro de la E-UTRAN y tiene dos funciones principales. La primera es la responsable de la gestión de los recursos de radio y la segunda de la asignación del tráfico de los usuarios para los enlaces descendentes y ascendentes, Además de la seguridad y reducir la latencia de la retransmisión de la capa superior.

Cada estación base (eNB) se conecta por medio de la interfaz S1⁵⁴ a la EPC. También, se puede conectar a las estaciones base (eNB) cercanas con la interfaz X2⁵⁵. Esta interfaz se emplea principalmente para señalar y reenviar los paquetes, además para intercambiar información de tráfico de los usuarios del sistema cuando estos se desplazan de un eNB a otro, en el momento de un

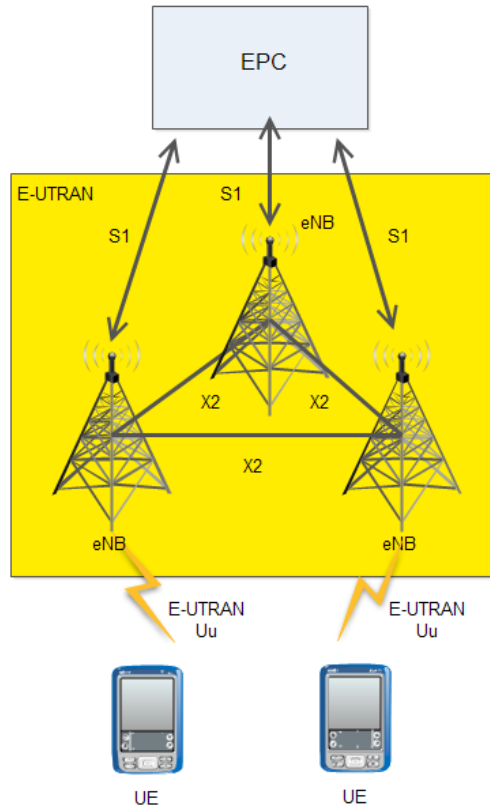
⁵³ Ibid., p. 65

⁵⁴ Ibid., p. 68

⁵⁵ Ibid., p. 70

traspaso (handover), otra interfaz es la Uu, y es la interfaz de radio que permite la transferencia de información entre el eNodeB y las UEs, a través, del canal de radio (ver ilustración 19).

Ilustración 19. Red de acceso E-UTRAN e Interfaces



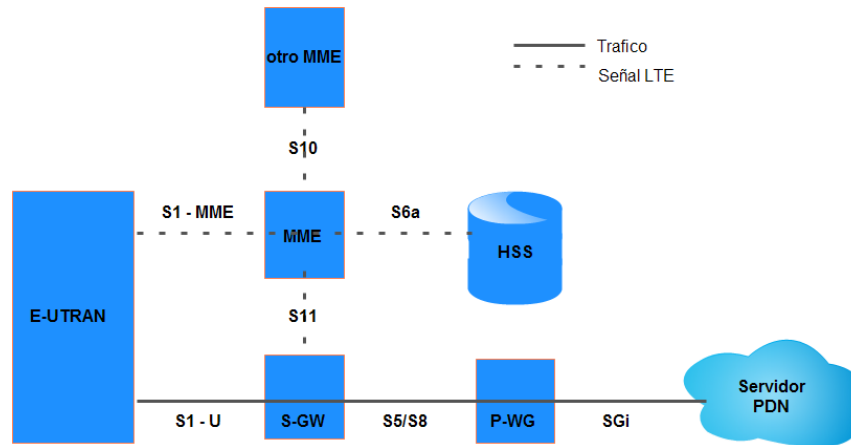
Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Núcleo de Paquetes Evolucionada EPC

La EPC es la red que brinda la conectividad IP y está integrada por tres elementos (ver ilustración 17), el MME (Mobility Management Entity), el Serving Gateway (S-GW) y el Packet Data Network Gateway (P-GW)⁵⁶.

⁵⁶ 3GPP. LTE o la cuarta generación (4G) de comunicaciones móviles: Evolved Packet System (EPS), [En Línea], 3GPP, España, 2012 [Citado 05-Oct-2015] Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11983/fichero/Cap%EDtulo+2+--+LTE.pdf>

Ilustración 20. Núcleo de paquetes evolucionada EPC



Fuente: Elaboración propia

Estos elementos junto con la base de datos del sistema llamada HSS (Home Subscriber Server), constituyen los elementos principales para la prestación del servicio de conectividad IP y se describen en la tabla 3.

Tabla 3. Componentes de la EPC

Elementos de la Red Troncal	Función
MME Mobility Management Entity	Es quien gestiona los procedimientos de movilidad y sesiones en el EPC. La MME se comunica con el móvil a través de NAS (Non Acces Stratum) de señalización y se comunica con el HSS, es responsable de la conexión EPS, gestiona la movilidad, el sistema de seguridad NAS, y la asistencia de traspaso.
S-GW Serving Gateway	Es el puerto de entrada de datos del usuario y el punto de salida de la parte E-UTRAN del CPE. Entre sus funciones incluye la interceptación de tráfico de abonados, el almacenamiento intermedio de datos de enlace descendente mientras el abonado está paginado. La puerta de enlace de servicio (S-GW) actúa como un router, y remite los datos entre la estación base y la puerta de enlace PDN.
P-GW	Asigna una dirección IP al equipo de usuario, realiza la facturación basada en el flujo que este genera. Encargado de la aplicación de QoS - Calidad de servicio.
PCRF Policy and Charging Rules Function	Crea reglas que permiten dar autorización QoS así como controlar funciones de facturación.

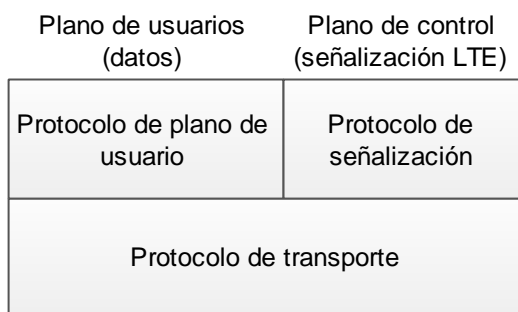
HSS Home Subscriber Server	Aloja datos acerca de subscripción e información dinámica como la identificación del MME, base de datos principal del sistema.
-----------------------------------	--

Fuente 3GPP

3.3 PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

La conmutación de paquetes es la principal característica de LTE, dichos paquetes viajan de la capa superior hacia el PDCP (Packet Data Convergence Protocol), quién se encarga de realizar la compresión de cabecera y cifrado del paquete. La pila de protocolos tiene dos planos. El plano general que son los datos de interés para el usuario y el plano de control (ver ilustración 21), que maneja mensajes de señalización que sólo son de interés para la red. La pila de protocolos tiene dos capas principales, la capa de red de radio y la capa de red de transporte⁵⁷.

Ilustración 21. Pila de protocolos



Fuente: Elaboración propia

Hay tres tipos de protocolos, los primeros son los protocolos de señalización que definen el lenguaje por el cual dos dispositivos pueden intercambiar mensajes de señalización entre sí, los segundos son protocolos de plano de usuario que se emplean manejar los datos en el plano de usuario, y los terceros son los protocolos de transporte, que se emplean en la transferencia de datos y mensajes de señalización de un punto a otro.

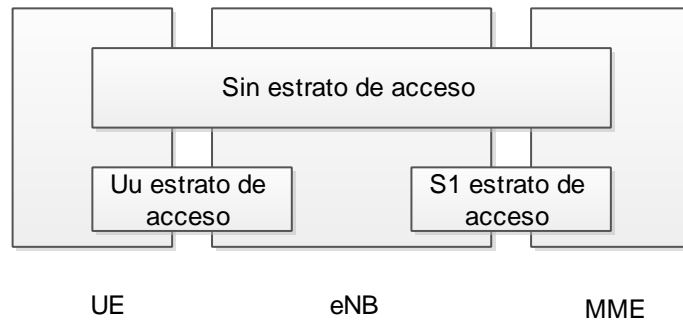
La MME controla el comportamiento de alto nivel del móvil enviando mensajes de señalización. Sin embargo, no hay trayectoria directa entre la MME y el móvil, a través del cual dichos mensajes pueden ser transportados⁵⁸. Para manejar esto, la interfaz de aire se divide en dos capas, conocido como el estrato de acceso (AS) y el no acceso de nivel (NAS). Los mensajes de señalización de alto nivel se

⁵⁷ COMES, Ramón, ÁLVAREZ, Francisco, ROMERO, Jordi y FERRÚS Ramón. , Op.cit., 89

⁵⁸ Ibid., p. 89

encuentran en el no acceso de nivel y se transportan usando los protocolos de acceso de las interfaces S1 y Uu.

Ilustración 22. Relación entre el acceso y sin el acceso en la interfaz de radio



Fuente: Elaboración propia

3.3.1 Protocolos de Capa Física

La capa física se comunica con la subcapa MAC mediante canales de transporte y se basa en la utilización de técnicas de acceso múltiple OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) en el enlace descendente y SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) en el enlace ascendente. La capa física del sistema LTE y está diseñada para que opere en las bandas de UHF (450 MHz - 3,5 GHz)⁵⁹. Los esquemas de modulación para el enlace ascendente son QPSK, 16-QAM y 64-QAM.

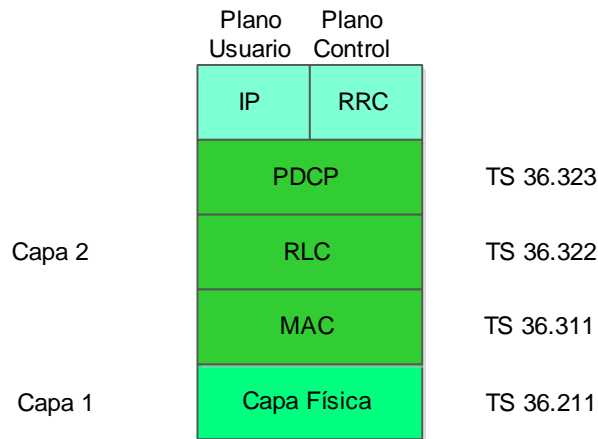
LTE emplea técnicas MIMO (Multiple Input Multiple Output) que tiene múltiples antenas en recepción y de transmisión para mejorar las prestaciones del enlace, consiste en transmitir el flujo de información por las múltiples antenas, mejorando la relación señal a ruido en la recepción, ofreciendo múltiples caminos de propagación⁶⁰. Además, tiene una canalización de hasta 20 MHz logrando alcanzar una velocidad de transmisión de pico a nivel de capa física de 150 Mb/s en el enlace descendente y de 75 Mb/s en el ascendente.

Tres protocolos hacen parte de la capa de enlace de datos (ver ilustración 23), el primero realiza control de bajo nivel de la capa física mediante la programación de las transmisiones de datos entre el móvil y la estación base. El segundo, es el control de enlace de radio (RLC) que mantiene el enlace de datos entre los dos dispositivos y el tercero es el protocolo de convergencia de datos por paquetes (PDCP) que realiza funciones de transporte de más alto nivel y están relacionados a la cabecera de compresión y la seguridad.

⁵⁹ Ibid., p. 177

⁶⁰ Ibid., p. 215

Ilustración 23. Protocolos de transporte interfaz aire



Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Bloque de Recursos Físicos (Physical Resource Block)

En LTE el recurso físico básico es bidimensional entre tiempo y frecuencia, se denomina RB (Resource Block) o PRB (Physical Resource Block). Es el mínimo elemento de información asignado por el eNB a un terminal móvil. Un PRB ocupa un ancho de banda de 180 KHz equivalente a 12 sub-portadoras (en frecuencia), separadas 15 KHz entre ellas ($12 \times 15 = 180$) y en él se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud del prefijo cíclico⁶¹. La duración de un PRB es de 0,5 ms, es decir la duración de un slot o ranura de tiempo.

En un PRB hay 7 símbolos con 12 sub-portadoras asociadas a cada uno de ellos, por lo que tenemos un total de 84 recursos ($12 \times 7 = 84$ RE). Un RE es una sub-portadora modulada con M niveles ($M = 4, 16, 64$) dependiendo si es QPSK, 16-QAM y 64-QAM, en el tiempo de un símbolo. Ya que la modulación de mayor eficiencia espectral es 64-QAM en la que se transmiten 6 bits/símbolo, dentro de un PRB se envía un total de 504 bits cada 0,5 ms, lo que nos genera una velocidad de transmisión de aproximadamente $R = 504 \text{ bits} / 0,5 \text{ ms} \sim 1 \text{ Mb/s}$ ⁶².

⁶¹ Ibid., p. 252

⁶² Ibid., p. 253

4. SIMULACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

En el mercado especializado de software para la simulación de redes existe un gran contraste en la oferta de estas dos tecnologías, ya que para la simulación con LTE se encuentran bastantes herramientas libres o licenciadas, lo que no sucede con WRAN, y más difícil es hallar un software que simule ambas tecnologías. Por lo tanto, para mantener la igualdad de parámetros, la simulación se elaborará en dos fases. La primera, será para determinar cobertura en las poblaciones calculando el nivel de intensidad irradiada de cada transmisor, y la segunda fase, se encargara de medir el rendimiento de la red, a través, de un escenario genérico que posiciona a los usuarios en el área de cobertura, realizando pruebas de tráfico en tres escenarios diferentes de forma independiente, primero se medirá la conectividad (ping) cargando la red con archivos menores a 10 Kbps, luego el acceso a archivos mediante el protocolo FTP (Protocolo de Transferencia de Archivos) con archivos de tamaño de 30 Kbps y finalmente transferencia de archivos de video con archivos superiores de 500 Kbps.

Para hacer las simulaciones, se realizó un primer filtro, basado en la disponibilidad y acceso a las herramientas que dispone el autor, por lo tanto, se evaluaron varios software como OPNET, OMNET ++, NetSim de Tetcos, Radio Mobile, Cell Planner, Atoll y Xirio. Se escogió Radio Mobile para simular cobertura y OMNET ++ para simular la red.

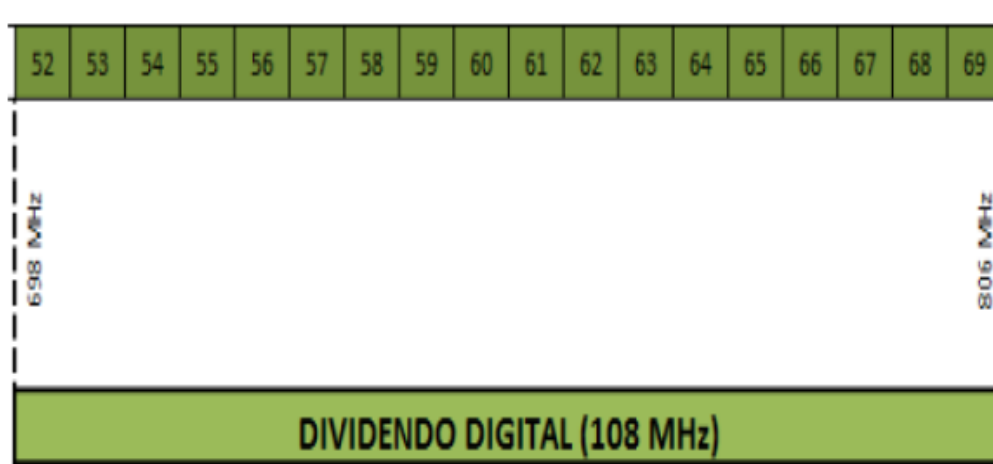
Con los resultados obtenidos se tendrá una guía de referencia para comparar las dos tecnologías, e identificar cual se ajusta mejor a los escenarios escogidos.

4.1 DIVIDENDO DIGITAL

La Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT divide al mundo en tres regiones, para reglamentar y administrar el espectro electromagnético. Colombia está ubicada en la región 2, y se le llama “Dividendo Digital” al segmento superior de la banda UHF (Ultra High Frequency) ubicado en el rango de los 698 MHz y 806 MHz. En la actualidad estas frecuencias están atribuidas a los servicios de radiodifusión (TV analógica). Como resultado de la conversión de la televisión analógica por la televisión digital, se liberan dichas frecuencias como se muestra en la ilustración 24.

Según la Comisión Interamericana de Telecomunicaciones CITEL, en la recomendación CCP II Rec.18, sugiere asignar este segmento del espectro liberado, resultado del “apagón analógico”, a servicios inalámbricos avanzados que promuevan la cobertura de la banda ancha. Para Colombia la ANE y el MinTIC proyectan este “apagón analógico” en el año 2019.

Ilustración 24. Banda del "Dividendo Digital" para la región 2

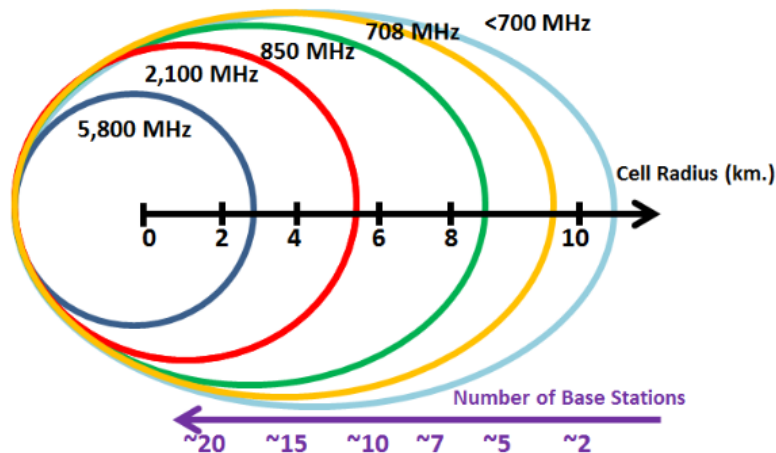


Fuente: ANE

La banda de los 700 MHz por ser menor a 1 GHz tiene mayor penetración “indoor” comparada con frecuencias de mayor densidad. Además, la pérdida de potencia es 10 dB menos que en la banda de los 2600 MHz⁶³. Todas estas características la hacen llamativa para implementar en las simulaciones y así ampliar la cobertura de la banda ancha con tecnologías inalámbricas en zonas rurales, dichas ventajas evidencian que al operar en la banda de los 700 MHz se realizara menor inversión en infraestructura por permitir mayor espaciamiento entre las estaciones base. Como se muestra en la ilustración 25, con dos radio bases en la banda de 700 MHz se pueden cubrir 10 kilómetros, comparado con el uso de 10 radio bases que brindan cobertura a cuatro kilómetros con la tecnología AWS (Advanced Wireless Services) que funciona en las bandas de los 1700 MHz y los 2100 MHz.

⁶³ 4G AMÉRICAS, Adjudicación de espectro radioeléctrico en 700 MHz en América Latina. [En Línea], 4G Américas, Agosto 2015 [Citado 05-Oct-2015] Disponible en http://www.4gamericas.org/files/3914/4053/6091/Adjudicacin_de_Espectro_Radioelctrico_en_700_MHz_en_Amrica_Latina_Agosto2015.pdf

Ilustración 25. Rangos de cobertura



Fuente: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico OCDE

Ya que el espectro radioeléctrico es un recurso limitado es preciso su optimización, siendo importante aprovechar esta oportunidad de renovar el uso de la frecuencia de los 700 MHz, en aplicaciones que brindan acceso de banda ancha a las comunidades. Dichas aplicaciones pueden ser la mejor forma de beneficiar a la comunidad. En la actualidad el MinTIC están en proceso de subasta de estas frecuencias y espera adjudicarlas en el año 2016.

4.2 RADIO MOBILE

Este simulador se empleará para simular la cobertura de las dos tecnologías WRAN y LTE. Desde la estación base se especificarán los diferentes parámetros como la distancia con los usuarios, la configuración de los transmisores y los receptores.

Este software es una herramienta gratuita utilizada para predecir el rendimiento de un sistema de radio, emplea datos de elevación digital del terreno, para la extracción automática del trayecto entre un emisor y un receptor, permite añadir datos ambientales y parámetros estadísticos para alimentar la irregularidad del terreno empleando modelos de propagación de radio⁶⁴. Es una herramienta poco potente comparada con las versiones comerciales como: Cell Planner⁶⁵ o Atoll⁶⁶,

⁶⁴ COUDÉ, Roger. Manual Radio Mobile: descripción, [En Línea], Comunicaciones Plus, Francia, 2015 [Citado 20-Oct-2015] Disponible en: <http://www.cplus.org/rmw/rme.html>

⁶⁵ INFOVISTA, Resumen de la solución, [En Línea], 2015 [Citado 25-Oct-2015] Disponible en: <http://www.infovista.com/company/about-infovista>

⁶⁶ FORSK, Características generales, [En Línea], Forsk, Francia, 2014 [Citado 20-Oct-2015] Disponible en: <http://www.forsk.com/atoll/>

sin embargo, brinda resultados aceptables y permite el uso de mapas gratuitos como el SRTM30⁶⁷ (Shuttle Radar Topography Mission).

4.2.1 Modelo de Propagación

El modelo de propagación es una aproximación matemática que busca describir la forma como la señal se propaga en un entorno determinado.

Los modelos de propagación tienen por finalidad caracterizar en qué medida afecta el medio de propagación a la energía electromagnética transportada por él, entre una antena transmisora y otra receptora. Se pretende conseguir una estimación razonable que permita el dimensionamiento adecuado de los sistemas radioeléctricos de comunicaciones⁶⁸.

El modelo de propagación implementado en “Radio Mobile” es llamado ITM (Irregular Terrain Model), que es basado en el algoritmo de Longley-Rice e integrado en el programa, permitiendo determinar el área de cobertura de un sistema de radiocomunicaciones.

4.2.1.1 Modelo de Propagación Longley - Rice

Este modelo relaciona información de la geometría del terreno, entre el trasmisor y el receptor, junto con las características refractivas de la troposfera. Es empleado en frecuencias, entre los 20 MHz y los 20 GHz (VHF y UHF), y tiene en cuenta parámetros de distancias entre 1 y 2.000 km. Adicionalmente, tiene en cuenta el perfil del terreno para la predicción punto a punto, o para la predicción de área. Además, analiza los fenómenos por dispersión troposférica para las distancias largas.

El modelo contempla los siguientes parámetros⁶⁹:

- Frecuencia entre 20 MHz y 20 GHz
- Distancia entre el transmisor y el receptor en kilómetros
- Altura de antena transmisora
- Altura de antena receptora
- Polarización Horizontal y Vertical

⁶⁷ COUDÉ, Roger, Op.cit., p.3

⁶⁸ PÉREZ VEGA, Constantino, CASANUEVA LÓPEZ, Alicia y ZAMANILLO José María. Sistemas de Telecomunicación. Santander. Publicaciones de la Universidad de Cantabria. 2007. 497 p.

⁶⁹ Los parámetros se desglosan en la documentación del programa “Radio Mobile”, que permite acceso libre a la documentación y código fuente y basa su funcionamiento en modelo Longley-Rice

- Constante Atmosférica
- Parámetro topográfico del terreno
- Curvatura de la tierra
- Constante dieléctrica de la tierra
- Tipo de Clima

Este modelo matemático está diseñado para desarrollar los cálculos en equipos de cómputo⁷⁰.

El modelo emplea datos de elevación del terreno, para esto el software trabaja con datos geográficos libres van de los 54 a los 862 MHz en una resolución de 100 metros. En la simulación se emplea el modelo SRTM DTED (Shuttle Radar Topography Mission – Digital Terrain Elevation Data) que se basa en los datos recogidos por la NASA en la misión SRTM del año 2000.

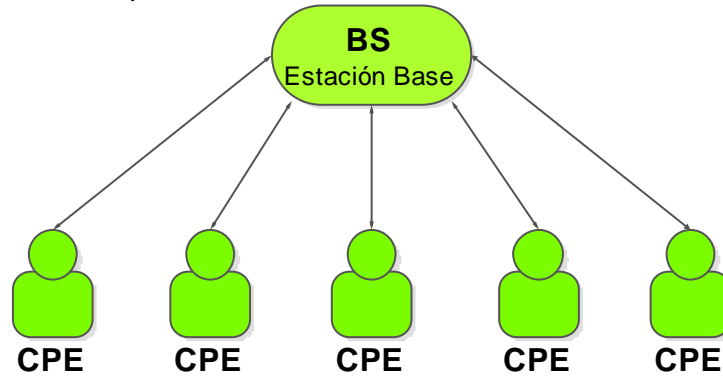
4.2.2 Simulación de Cobertura WRAN

Para la simulación de cobertura del estándar IEEE 802.22 se sitúa la estación base SB en el punto topográficamente más alto cercano a la población, y de ser posible que concuerde con localizaciones empleadas anteriormente para esta labor (esto se evaluó con la herramienta de la ANE para analizar el espectro, permitiendo identificar la ubicación de las antenas en cada municipio del país). Además, se posicionarán cinco receptores CPE en diferentes coordenadas del municipio. La simulación se visualiza sobre Google Maps permitiendo observar la intensidad de la señal y la cobertura en el municipio.

El escenario típico que se implementara en todos los municipios, contempla una Estación Base (BS) operando en la frecuencia de los 700 MHz con un ancho de banda de 6 MHz y 5 CPEs (pasivos), ubicados aleatoriamente en el municipio incluido casco urbano y área rural. La conexión será de forma inalámbrica y la topología punto a multipunto, ver ilustración 26.

⁷⁰ AG, Longley y PL Rice. Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain – A Computer Method 1968, página 3-24

Ilustración 26. Escenario típico



Fuente: Elaboración propia

Los parámetros de Transmisión de la Estación Base (BS) y el Equipo Local del Cliente (CPE) se han tomado de la referencia⁷¹ y se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de simulación estándar IEEE 802.22

Parámetros	Estación Base BS	Equipo Local de Cliente CPE
Numero de Celdas	1	1
Nodos	1	5
Ubicación	Fija	Fija / Aleatoria
Ancho de banda del canal	6	6
Frecuencia mínima (MHz)	698	698
Frecuencia máxima (MHZ)	704	704
Polarización	Horizontal / Vertical	Horizontal / Vertical
Altura Antena (m)	30	5
Modo estadístico	Difusión	Difusión
Clima	Ecuatorial	Ecuatorial
Topología	Red de Datos	Red de Datos
Potencia del transmisor (dBm)	36	0
Umbral del receptor (dBm)	0	-97
Perdida de la línea (dB)	1	1
Ganancia TX (dBi)	12	0
Ganancia RX (dBi)	0	12
Tipo de antena	Omnidireccional	Direccional
Permitividad relativa al suelo	15	15

Fuente: Elaboración propia

⁷¹ PRADILLA CERON, Juan Vicente, Tecnología de canal de retorno para el estándar DVB-T mediante el uso de WRAN. [En línea] Universidad ICESI, 2013 [Citado 25-Oct-2015] Disponible en Internet: http://bibliotecadigital.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/68395/1/tecnologia_canal_retorno.pdf

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los municipios, que consiste en dos gráficas, la primera muestra la disposición de la red y la segunda el área de cobertura de la estación base BS geográficamente en representación cenital.

La escala de colores empleada se puede observar en la ilustración 27 y ésta dada en dBm. El valor mínimo se representa con el color azul y equivale a -97 dBm⁷² que es el valor umbral para asegurar conectividad en los equipos de usuario CPE.

Ilustración 27. Escala de colores mapa de cobertura



Fuente: Elaboración propia con Radio Mobile

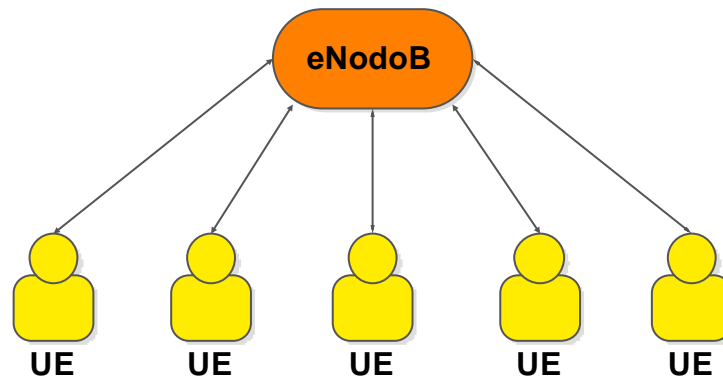
4.2.3 Simulación de Cobertura LTE

Para la simulación de cobertura se sitúa el eNodoB perteneciente a la E-UTRAN en el punto topográficamente más alto cercano a la población, al igual que en la simulación de WRAN. Además, se posicionan cinco receptores UE ubicados aleatoriamente en diferentes coordenadas del municipio. La simulación se visualiza sobre Google Maps mostrando la intensidad de la señal y la cobertura en el terreno.

El escenario típico implementado en todos los municipios, está integrado por un eNodoB que funciona en la frecuencia de los 700 MHz con un ancho de banda de 5 MHz y 5 UEs (pasivos) que se ubican en diferentes lugares del municipio incluido el casco urbano y el área rural. La conexión será de forma inalámbrica y la topología punto a multipunto, ver ilustración 28. Para la simulación no se consideran otros sistemas que puedan ocasionar interferencias en la zona de despliegue y solo se simula el enlace de bajada.

⁷² Ibid., p. 45

Ilustración 28. Escenario típico



Fuente: Elaboración propia

Los parámetros de Transmisión del eNodeB y el equipo de usuario UE se han tomado de la referencia⁷³ y se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de simulación

Parámetros	eNodeB	Equipo de Usuario UE
Numero de celdas	1	1
Nodos	1	5
Ubicación	Fija	Fija / Aleatoria
Ancho de banda del canal	5	5
Frecuencia mínima (MHz)	698	698
Frecuencia máxima (MHZ)	702	703
Polarización	Horizontal / Vertical	Horizontal / Vertical
Ganancia antena (dBi)	18	0
Altura Antena (m)	30	1.5
Modo estadístico	Difusión	Difusión
Clima	Ecuatorial	Ecuatorial
Topología	Red de Datos	Red de Datos
Potencia del transmisor (dBm)	36	0
Factor de ruido (dB)	0	2
Umbral del receptor (dBm)	0	-90
Perdida de la línea (dB)	2	1
Tipo de antena	Omnidireccional	Omnidireccional
Permitividad relativa al suelo	15	15

Fuente: Elaboración propia

⁷³ Ibid., p. 48

Luego, se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los municipios, que consiste en dos gráficas. La primera muestra la disposición de la red y la segunda el área de cobertura del eNodeB en el municipio en representación cenital.

La escala de colores empleada se puede observar en la ilustración 29 y ésta dada en dBm, su valor mínimo es representado por el color azul e indica -90 dBm⁷⁴ que es el valor umbral para asegurar conectividad en los equipos de usuario UEs.

Ilustración 29. Escala de colores mapa de cobertura



Fuente: Elaboración propia con Radio Mobile

4.2.4 Desarrollo y resultados de la simulación de cobertura LTE y WRAN

A continuación, se muestra de forma paralela como en cada municipio se realizan las simulaciones de cobertura y los resultados obtenidos. En el costado izquierdo se muestra la tecnología WRAN y en el derecho LTE.

4.2.4.1 Acandí

El municipio de Acandí, cuenta con una población de 9842 habitantes⁷⁵ entre ocho centros poblados. Lo primero que hacemos es ubicar el punto más elevado topográficamente, donde instalaremos la antena (ver ilustración 30). Para el caso, está ubicado a 5,93 Km del casco urbano de Acandí, en las coordenadas Latitud 8.471835 y Longitud -77.320612, con una elevación sobre el nivel del mar de 247 m.

⁷⁴ Ibid 45

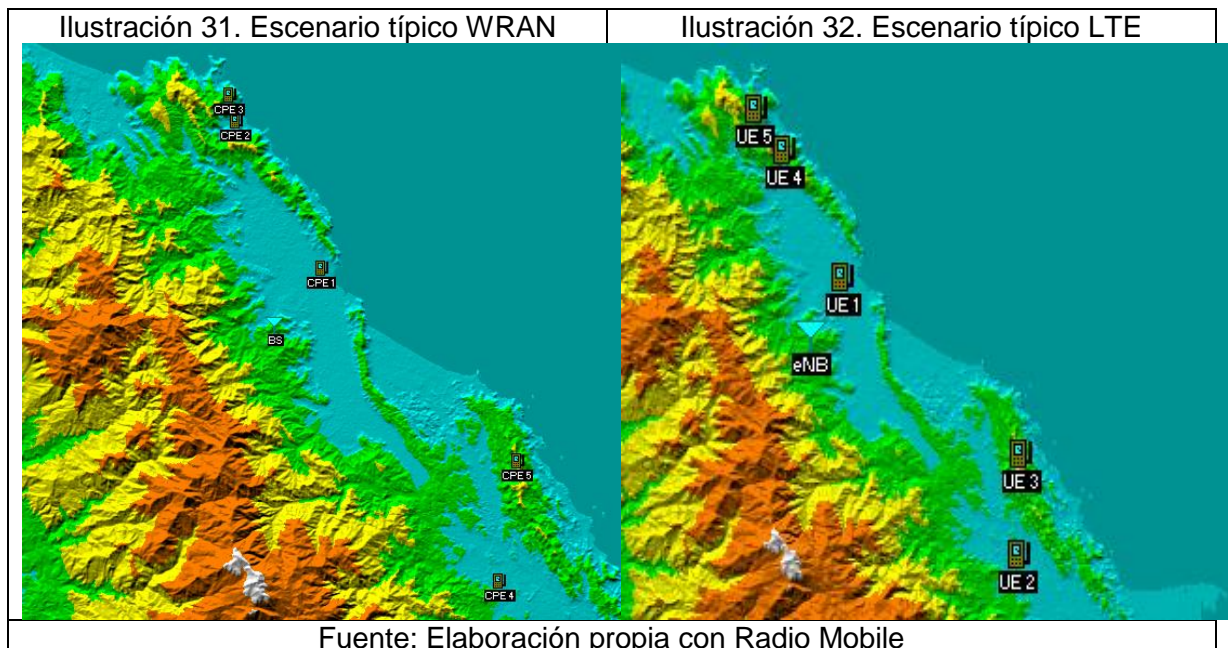
⁷⁵ Alcaldía de Acandí, Op.cit., p.3

Ilustración 30. Ubicación Estación Base

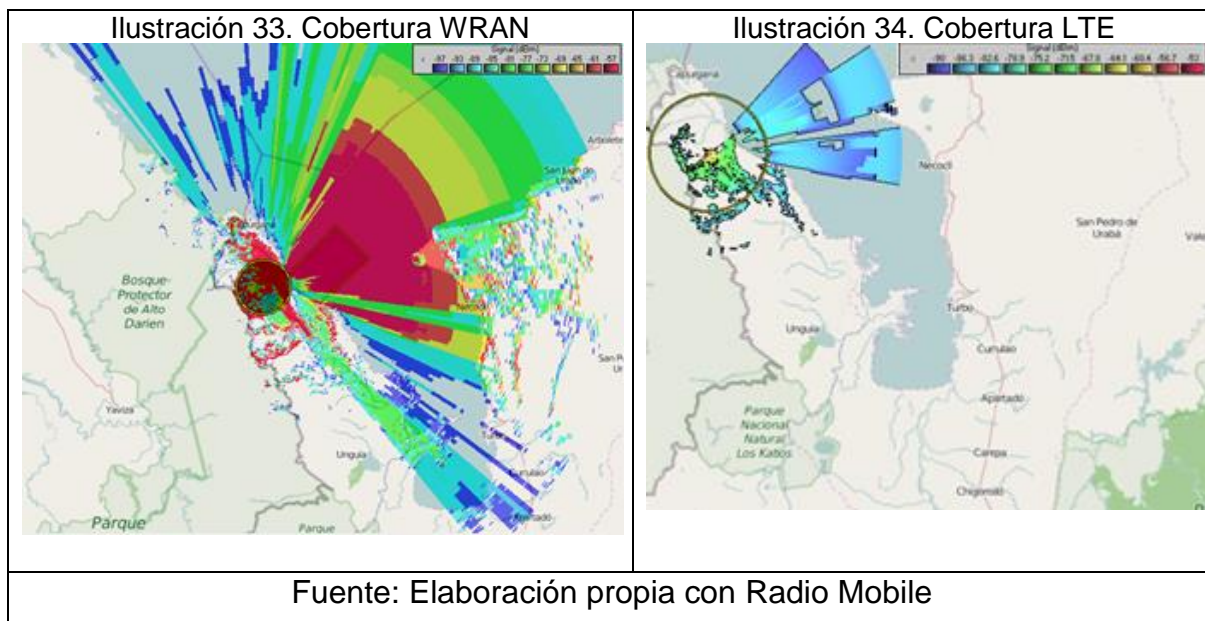


Fuente: Elaboración propia con Radio Mobile

Comenzando con la simulación y después de identificar el punto más alto cerca al casco urbano, se ubican los componentes de las tecnologías en el mapa del municipio de Acandí. Al lado izquierdo se muestra la ubicación del escenario típico del estándar IEEE 802.22 compuesto por una estación base BS y 5 CPEs (ilustración 31) y en el lado derecho se muestra la implementación de la tecnología LTE compuesto por un eNodeB y 5 UEs (ilustración 32).



A continuación, en la ilustración 33 (lado izquierdo) se muestran los resultados de cobertura de la red inalámbrica de área regional WRAN y en la ilustración 34 (lado derecho) la red LTE en el municipio de Acandí. Los resultados son dados en dBm, representados por una coloratura que comienza en rojo que significa el área de mayor intensidad de la señal, hasta el color azul que es el umbral mínimo de recepción de los equipos. Para facilitar su visualización y debido a que Google Earth no tiene buenas fotografías del sector, se superpone en Google Maps.



4.2.4.2 Nuquí

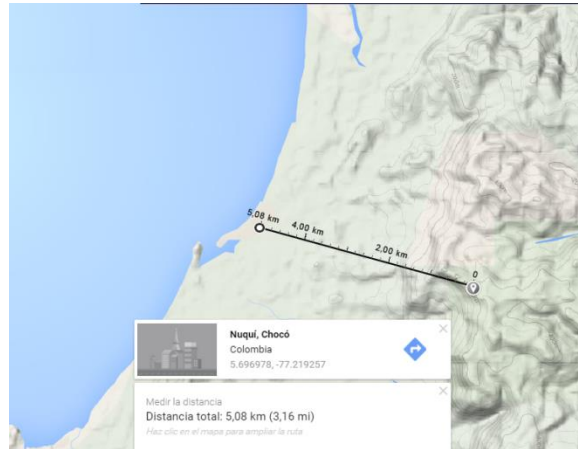
El segundo municipio es el de Nuquí que cuenta con una población de 8275⁷⁶ habitantes, en nueve centros poblados⁷⁷.

Lo primero que hacemos es ubicar el punto más elevado topográficamente, donde se ubica la antena. Para el caso, está ubicado a 5.8 Km del casco urbano de Nuquí, en las coordenadas Latitud 5.696970 y Longitud -77.219257, con una elevación sobre el nivel del mar de 432 m, ver ilustración 35.

⁷⁶ Alcaldía de Nuquí, Op.cit., p.3

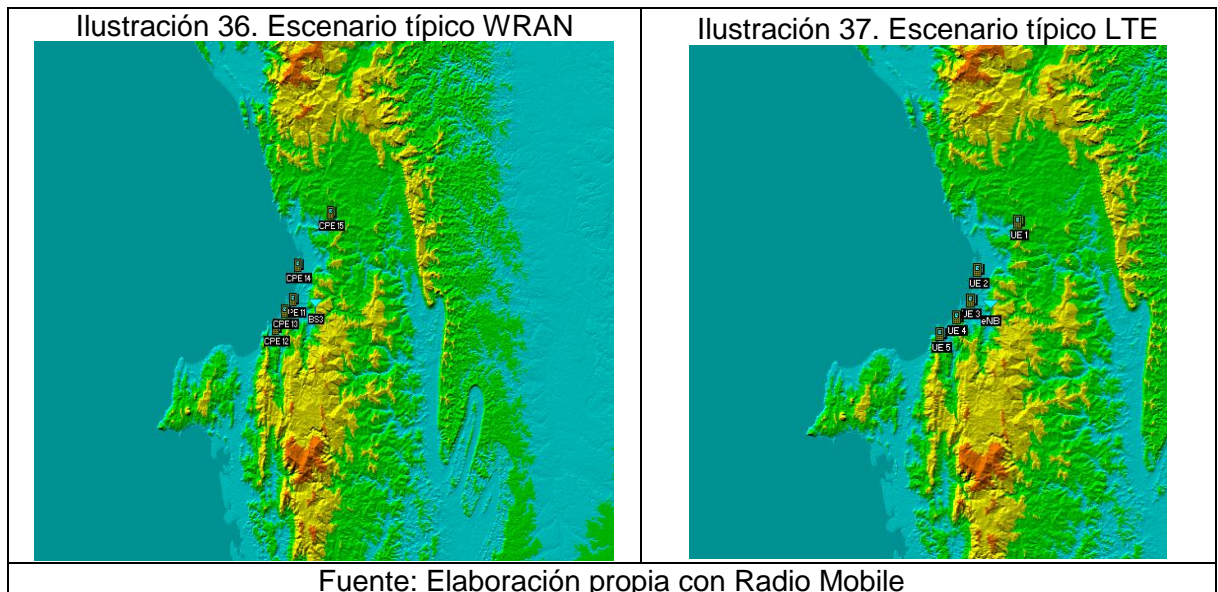
⁷⁷ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, Op.cit., p.1

Ilustración 35. Ubicación Estación Base



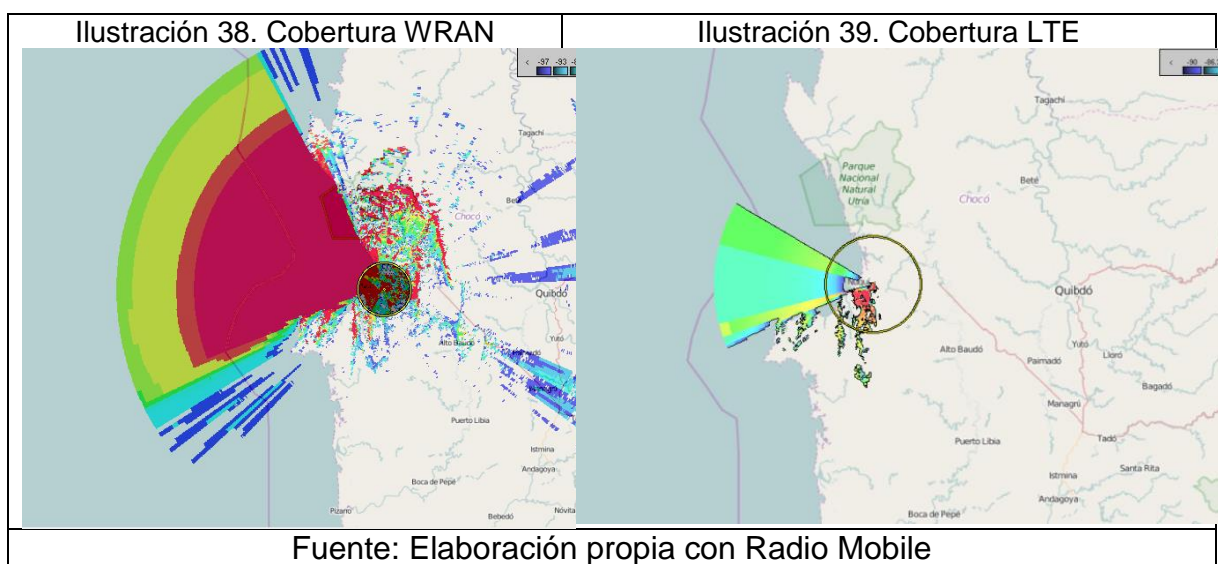
Fuente: Radio Mobile

Comenzando con la simulación y después de identificar el punto más alto cerca al casco urbano, se ubican los componentes de las tecnologías en el mapa del municipio de Nuquí. Al lado izquierdo se muestra la ubicación del escenario típico del estándar IEEE 802.22 compuesto por una estación base BS y 5 CPEs (ilustración 36) y en el lado derecho se muestra la implementación de la tecnología LTE compuesto por un eNodeB y 5 UEs (ilustración 37).



A continuación, en la graficas del lado izquierdo se muestran los resultados de cobertura de la red inalámbrica de área regional WRAN (ver ilustración 38) y en el

lado derecho la red LTE (ver ilustración 39) en el municipio de Nuquí. Los resultados son dados en dBm, representados por una coloratura que comienza en rojo que significa el área de mayor intensidad de la señal, hasta el color azul que es el umbral mínimo de recepción de los equipos. Para facilitar su visualización y debido a que Google Earth no tiene buenas fotografías del sector, se superpone en Google Maps.



4.2.4.3 Ungía

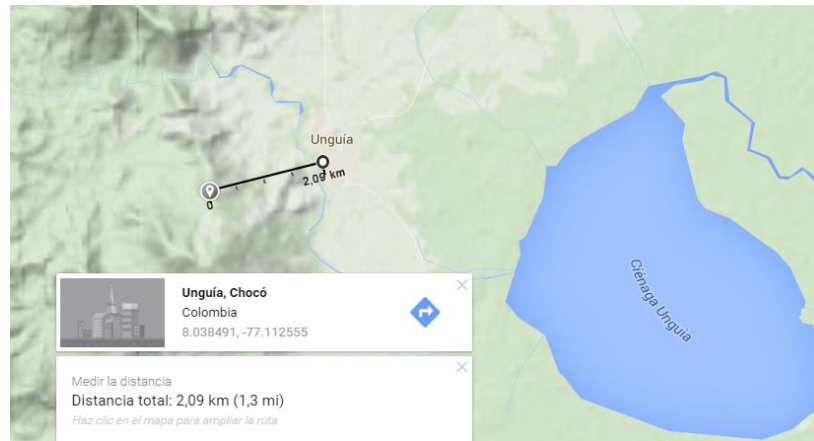
El tercer municipio es Ungía que cuenta con una población de 14973⁷⁸ habitantes, en 14 centros poblados⁷⁹.

Se ubica el punto más elevado topográficamente del sector, donde se instala la antena. Para el caso, está ubicado a 2.09 Km del casco urbano de Unguía, en las coordenadas Latitud 8.038491 y Longitud -77.112555, con una elevación sobre el nivel del mar de 432 m, ver ilustración 40.

⁷⁸ Alcaldía de Unguía, Op.cit., p.5

⁷⁹ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, Op.cit., p.1

Ilustración 40. Ubicación Estación Base



Fuente: Elaboración con Radio Mobile

Comenzando con la simulación y después de identificar el punto más alto cerca al casco urbano, se ubican los componentes de las tecnologías en el mapa del municipio de Unguía. Al lado izquierdo se muestra la ubicación del escenario típico del estándar IEEE 802.22 compuesto por una estación base BS y 5 CPEs (ilustración 41) y en el lado derecho se muestra la implementación de la tecnología LTE compuesto por un eNodeB y 5 UEs (ilustración 42).

Ilustración 41. Escenario típico WRAN

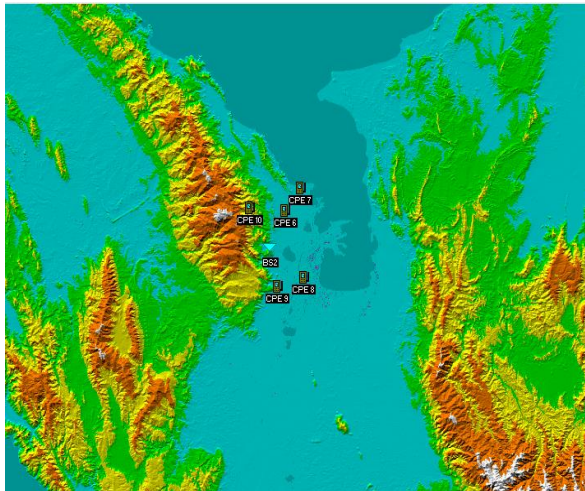
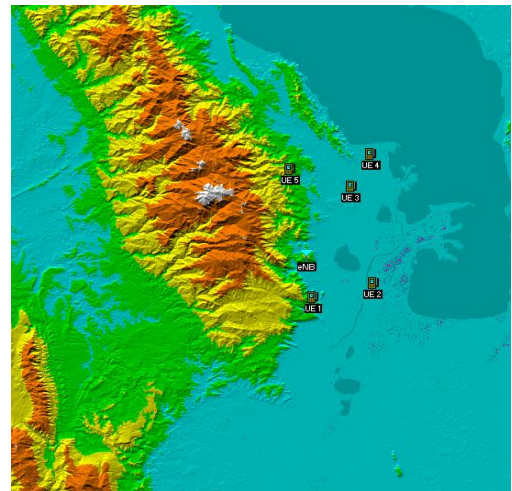


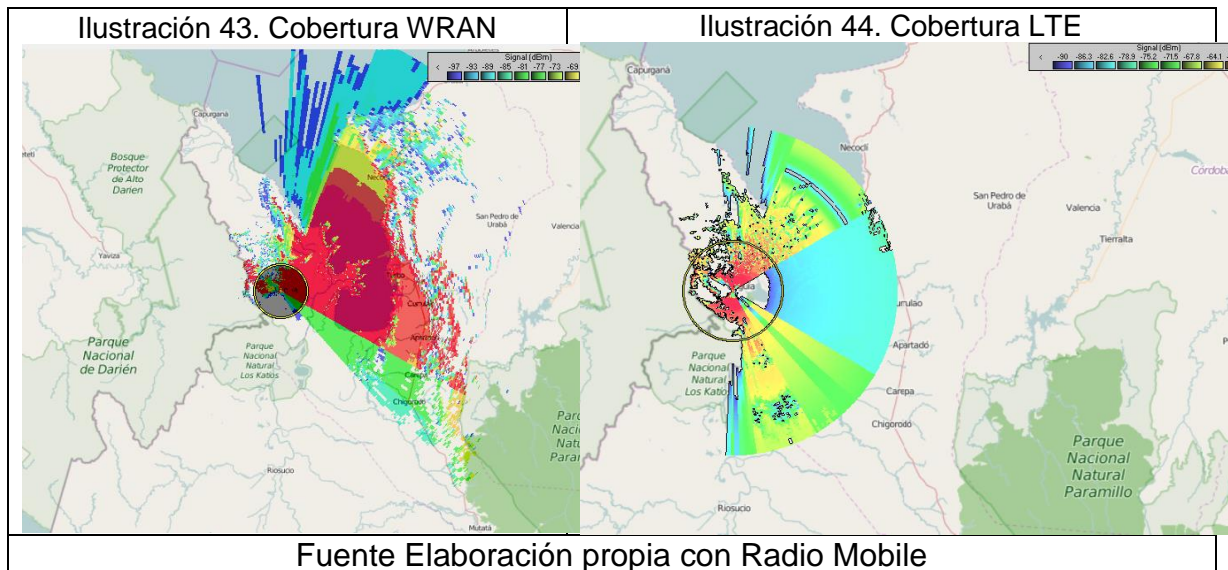
Ilustración 42. Escenario típico LTE



Fuente: Elaboración propia en Radio Mobile

A continuación, en la graficas del lado izquierdo se muestran los resultados de cobertura de la red inalámbrica de área regional WRAN (ver ilustración 43) y en el

lado derecho la red LTE (ver ilustración 44) en el municipio de Unguía. Los resultados son dados en dBm, representados por una coloratura que comienza en rojo que significa el área de mayor intensidad de la señal, hasta el color azul que es el umbral mínimo de recepción de los equipos. Para facilitar su visualización y debido a que Google Earth no tiene buenas fotografías del sector, se superpone en Google Maps.



4.3 OMNET ++

El programa empleado a nivel de red es OMNET ++, el cual es un simulador de eventos discretos⁸⁰, esto quiere decir que las simulaciones no son continuas en el tiempo, por lo que se define un lapso de tiempo específico y en ese intervalo no cambian los valores de las variables. OMNET ++ es una herramienta de modelado y simulación con licencia educativa, basado en componentes modulares programados en C++, que ensamblan módulos compuestos con un lenguaje de alto nivel y con un ambiente de simulación de arquitectura abierta.

El software se complementa con múltiples herramientas de código libre. Para el caso de la tecnología LTE se emplea SimuLTE y para el escenario de WRAN se usa Mixim con su módulo de radio cognitiva.

La simulación en OMNET ++ consiste en módulos jerárquicamente anidados que se comunican entre sí. Inicialmente se configuran los módulos simples que sirven como componentes para módulos más complejos. Los datos que se pueden

⁸⁰OMNET ++, User Manual. [En Línea], 2015 [Citado 30-Oct-2015] Disponible en: <https://omnetpp.org/doc/omnetpp/manual/usman.html>

paramétrizar son: la velocidad de datos, retardo de propagación, tasa de error de bits y tasa de error de paquetes, y pueden ser desactivados.

Las dos tecnologías se simulan en escenarios que emplean redes IP, por lo que a nivel de red no se aprecian diferencias, las diferencias se observan al implementar sus componentes de transmisión.

El software se emplea para realizar una simulación para cada tecnología, ya que la red al tener un nivel de señal aceptable y al definir parámetros estándar logra una aproximación del comportamiento de las estaciones base (SB o eNodeB) y sus subscriptores.

Para la simulación de los escenarios en OMNET ++, la red tiene una configuración de conexión punto a multipunto y se realizan tres tipos de pruebas. La primera es para verificar la conectividad, cargar la red e identificar la latencia de la respuesta enviando un ping a los host conectados, la segunda consiste en transferir archivos desde un servidor FTP (File Transfer Protocol) a cualquier PC, son archivos de un tamaño que oscila entre 30 Kbps a 100 Kbps y la tercera es la transmisión de archivos de video archivos con un tamaño de entre 500 Kbps y 900 Kbps. Las pruebas se realizan de forma independiente y el tráfico se observa en los enlaces descendentes de la red.

La simulación no contempla escenarios de movilidad, aunque es pertinente aclarar que OMNET ++ cuenta con un algoritmo de movilidad y también las tecnologías LTE y WRAN soportan movilidad para sus usuarios.

Para desarrollar las simulaciones primero se construye el modulo compuesto, que corresponde al escenario típico de la tecnología que se va a simular, en su interior se encuentran unos módulos anidados, que corresponden a los componentes específicos de la arquitectura de cada tecnología, para el caso del estándar IEEE 802.22 sería la SB, el CPE y el servidor y para LTE sería el servidor, el eNB y el UE. De esta forma se le asigna una jerarquía de comunicación a cada módulo⁸¹.

Luego se define la estructura del modelo en el lenguaje NED, esto se puede hacer con texto o de forma gráfica con el editor IDE que está basado en Eclipse.

Después, los módulos simples se programan en C++ empleando el kernel de simulación o las bibliotecas de clases. En este momento ya se genera un archivo de arranque omnetpp.ini, que se pone a correr las veces que sean necesarias y con diferentes parámetros. El código se puede enlazar con herramientas gráficas para graficar.

Finalmente los resultados se escriben en un vector de salida para graficarlos. Para nuestro caso se emplea Excel.

⁸¹ Ibid., Capítulo. 4

4.3.1 Simulación del Estándar IEEE 802.22

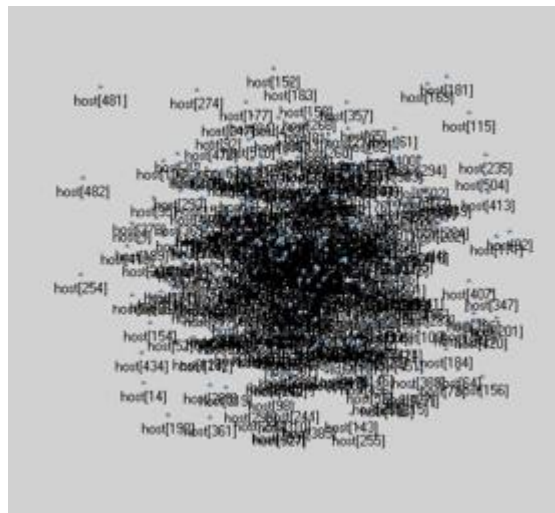
Inicialmente se importan librerías de OMNET ++ como Scalars y Plove que son para graficar y analizar los archivos finales. Además, se instala un entorno integrado de desarrollo (IDE) basado en Eclipse y la librería Maxim que tiene entre sus herramientas un módulo de radio cognitiva. Ya funcionando el simulador y con las librerías instaladas se define un área de trabajo o ROI (Region of Interest) que se muestra en la ilustración 38, que consiste en un cuadrado con medidas fijas, para este caso será de 30 Km por lado (playgroundSizeX 30000, playgroundSizeY 30000) ver ilustración 45 y 46.

Ilustración 45. Código tamaño ROI

```
*.playgroundSizeX = 30000m  
*.playgroundSizeY = 30000m  
*.playgroundSizeZ = 0m  
**.coreDebug = true
```

Fuente: Elaboración propia Omnet ++

Ilustración 46. ROI

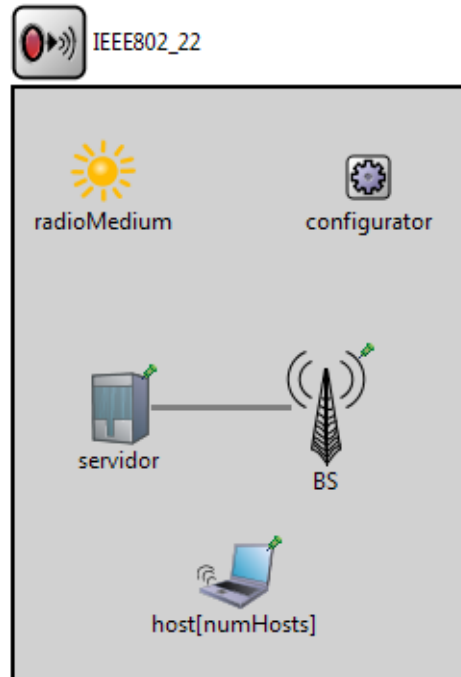


Fuente: Elaboración propia con Omnet ++

Luego, se diseña la red general que se muestra en la ilustración 47, compuesta por sub módulos. Estos son: el transmisor que es diseñado con los parámetros del estándar IEEE 802.22 (radio cognitiva) para que se comporte como la estación base SB, un servidor que da respuesta a las peticiones de los usuarios y los equipos locales de los clientes CPEs, que se distribuyen aleatoriamente con una función estadística normal. Estos CPE son clientes primarios con interfaz 802.22.

Esta red se emplea para la simulación de los tres escenarios ping, ftp y transferencia de video.

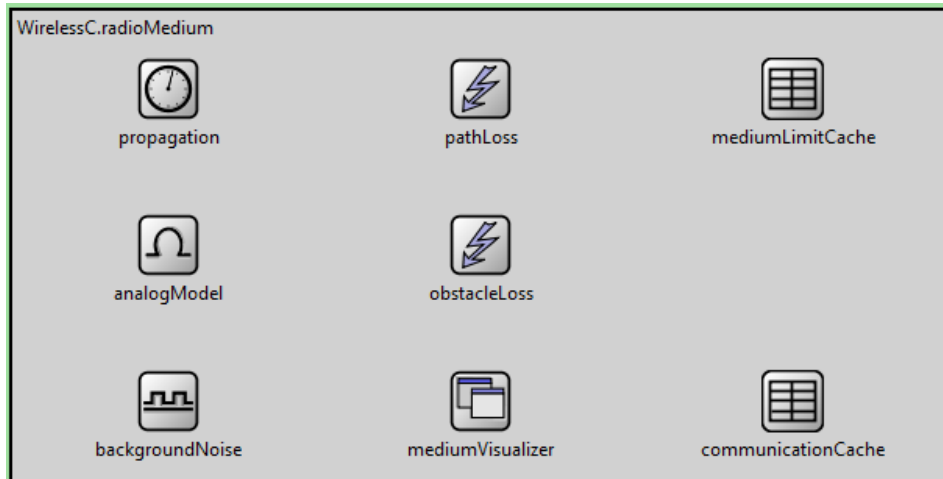
Ilustración 47. Red de Simulación WRAN



Fuente: Elaboración propia con Omnet ++

A continuación, se describen los componentes que integran la red. Primero está el radioMedium que es un componente prediseñado y tiene los componentes de la radio cognitiva, los parámetros ingresados son la frecuencia de funcionamiento que es de 700 MHz (channelcontrol.carrierFrequency), se asigna el modelo de propagación (channelcontrol.propagationModel: RayleighModel, radio.attenuation Model: RayleighModel y radio.channelModel AWGN).

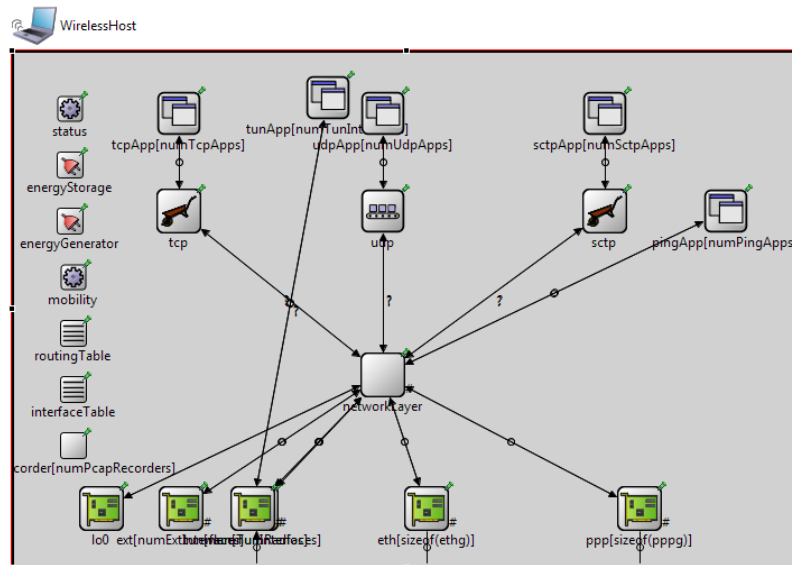
Ilustración 48. Sistema de radio cognitiva



Fuente: Elaboración propia Omnet ++

El CPE o wirelessHost para este caso, (ver ilustración 49) representa los equipos locales del cliente que se encargan de acceder a los contenidos y entre paréntesis se coloca el número de los mismos, para las pruebas se varia el número de cien (100) a quinientos (400) de cien en cien, como no se va a trabajar movilidad se configura `host*.mobilityType: NullCityMobility`.

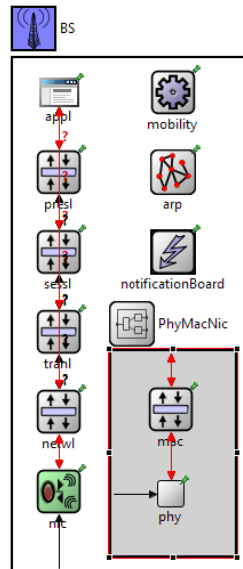
Ilustración 49. Diagrama CPE



Fuente: Elaboración propia en Omnet ++

Para configurar la estación base BS se emplea una estación base del estándar IEEE 802.16 Wimax, que a nivel de capa MAC tiene un comportamiento similar a el estándar IEEE 802.22 y con la herramienta Mixim del simulador se complementa el módulo de radio cognitiva a la capa PHY. La BS funciona como vínculo entre el servidor y el CPE (ver ilustración 50).

Ilustración 50. Diagrama estación base BS



Fuente: Elaboración propia Omnet ++

El servidor se encarga de ofertar los servicios de respuesta de ping, servidor ftp y servidor de video. Para iniciar en OMNET ++, cada escenario como ping, ftp y transmisión de video es necesario configurar un archivo omnetpp.ini con los parámetros que se muestran a continuación.

A continuación, se plantean tres escenarios con tres tipos de tráfico que circularán por la red.

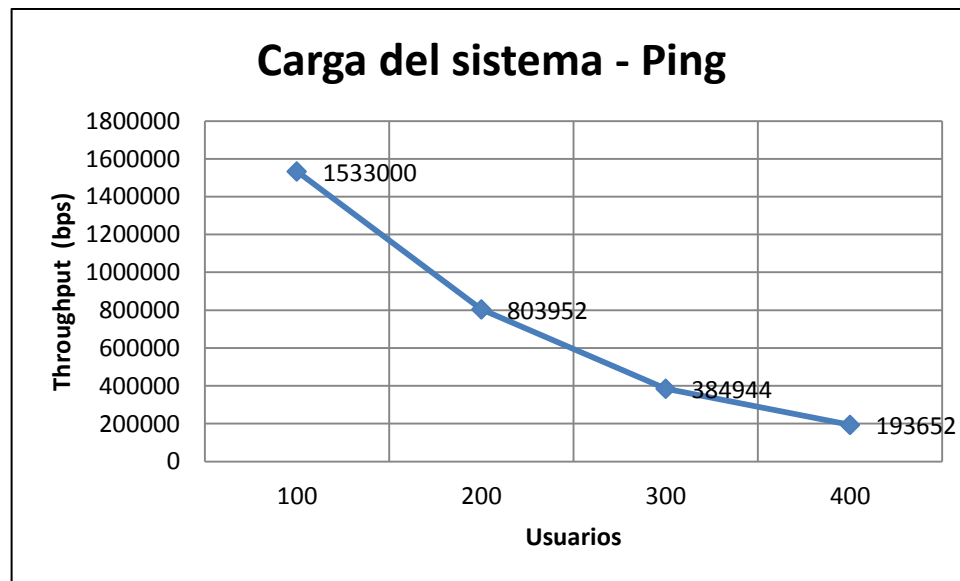
4.3.1.1 Simulación de Ping

El Ping (Packet Internet Groper) es un comando empleado para diagnosticar la conexión entre la red y una dirección IP (destino) remota⁸², por medio del envío de paquetes de datos empleando el protocolo ICMP (Internet Control Message Protocol). Este ejercicio tiene como finalidad generar una carga a la red, e identificar conectividad entre los usuarios de la misma.

⁸² RAYA Jose Luis, Raya Laura, Redes Locales, Alfaomega, México, 2006. p. 56

Para desarrollar la simulación en OMNET ++, primero se configura el host al que se le realiza la prueba (`host[].pingApp.destAddr = srv`) y luego el tiempo de los intervalos (`pingApp.interval = 200ms`). Los resultados del throughput se muestran en la ilustración 51.

Ilustración 51. Resultado carga de la red - ping



Fuente: Elaboración propia

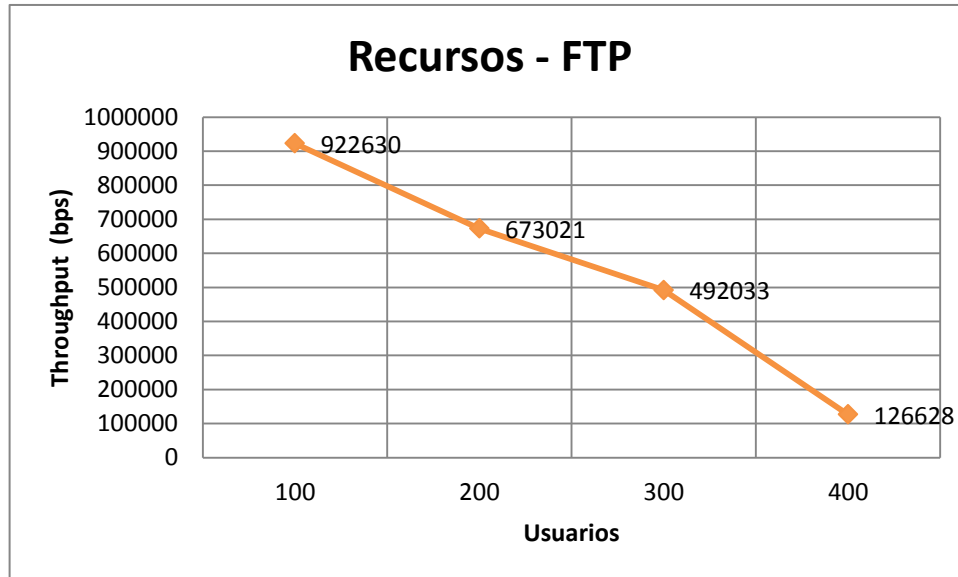
4.3.1.2 Simulación de Archivos FTP

Esta prueba consiste simular el acceso a archivos FTP (File Transfer Protocol) que es el protocolo empleado para enviar o recibir archivos, como conectarse a un portal web y tiene como objetivo intercambiar archivos, poniendo a prueba la conectividad con el servidor FTP y accesibilidad a internet. Para este caso los clientes acceden a un archivo de 100 Kbps mediante ftp, configurando los siguientes parámetros:

- `** .srv.tcpAppType = TCPSinkApp`
- `** .srv.numTcpApps = 1`
- `** .srv.tcpApp[].port = 1000`
- `** .host.tcpAppType = TCPSessionApp`
- `** .host.tcpApp[].connectAddress = srv`
- `** .host*.tcpApp[0].connectPort = 1000`
- `** .host*.tcpApp[0].tOpen = 0`
- `** .host*.tcpApp[0].tSend = 0`
- `** .host*.tcpApp[0].sendBytes = 100 Kbps`

- `** .host*.tcpApp[0].tClose = 0`
- `** .tcpApp[*].port = -1`

Ilustración 52. Conexión servidor ftp



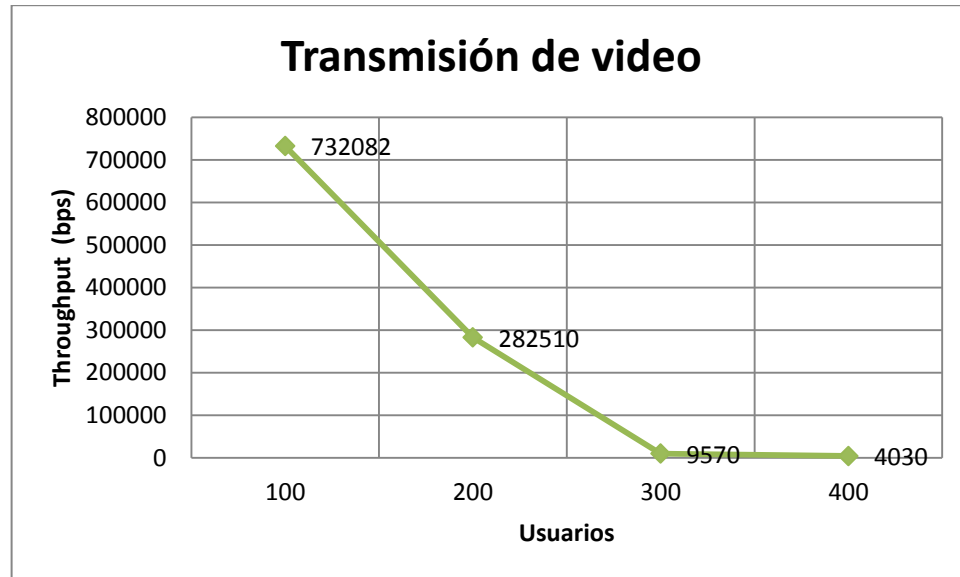
Fuente: Elaboración propia

4.3.1.3 Simulación de Transmisión de Archivos de Video

Esta prueba consiste en que los CPEs realizan un streaming de video de 500 Kbps. Y se configura con los siguientes parámetros:

- `** .numUdpApps = 1`
- `** .srv.udpAppType = UDPVideoStreamS`
- `** .srv.udpApp[*].videoSize = 500 Kbps`
- `** .srv.udpApp[*].serverPort = 300`
- `** .srv.udpApp[*].waitInterval = 10ms`
- `** .srv.udpApp[*].packetLen = 1000B`
- `** .host*.udpAppType = UDPVideoStreamCli`
- `** .host*.udpApp[*].serverAddress = srv`
- `** .host*.udpApp[*].localPort = 9999`
- `** .host*.udpApp[*].serverPort = 3088`
- `** .host*.udpApp[*].startTime = 0`

Ilustración 53. Resultados transmisión de video



Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Simulación de LTE

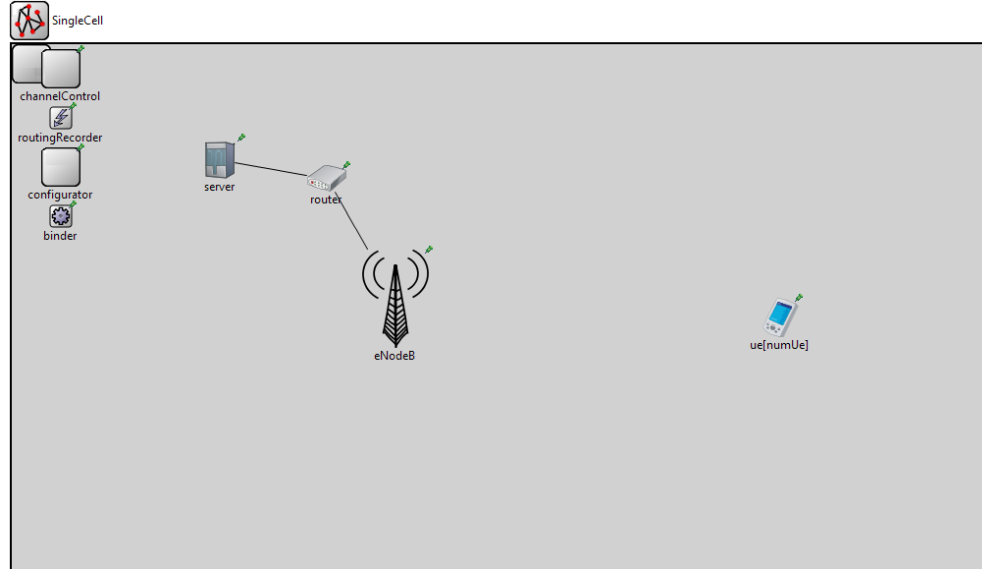
Inicialmente se importa el complemento de OMNET ++ para las simulaciones de LTE, SimuLTE, que es una herramienta de alto nivel que evalúa las redes LTE⁸³. Luego, se diseña la red general que se muestra en la ilustración 54 (incluido el ROI de 17 Km), compuesta por sub módulos como un eNodeB que esta implementado como herramienta en SimuLTE, y funciona como estación base eNB (la simulación es de celda sencilla), un servidor que da respuesta a las peticiones de los equipos de usuario UE.

A los equipos de usuario UE, se les asigna un valor determinado que varía de 100 a hasta 400, para emplear en los diferentes rangos de usuarios de las simulaciones. La distribución de los UE es aleatoria con una función estadística normal. Esta red se emplea para la simulación de los tres escenarios ping, ftp y transferencia de video.

La simulación en la banda de los 700 MHz tiene un ancho de canal de 5 MHz y no emplea la técnica de radio MIMO.

⁸³ NARDINI, Giovanni, STEA, Giovanni y VIRDIS, Antonio. [En Línea], Universidad de Pisa, Italia 2015 [Citado 30-Oct-2015] Disponible en: <http://simulte.com/>

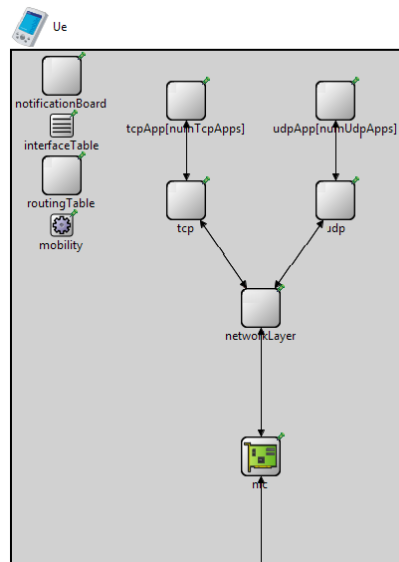
Ilustración 54. Red de Simulación LTE



Fuente: Elaboración propia con Omnet ++ - SimuLTE

A continuación, se describen los componentes que integran la red. Primero está el servidor que es un componente prediseñado y se le realizarán pruebas de conectividad ping, transferencia de archivos ftp (100 Kbps) y archivos de video (500 Kbps). El segundo es el eNodeB que funciona a 700 MHz y el tercer componente de la red es el UE que para el ejercicio varía de 100 a 400 usuarios (ver ilustración 55).

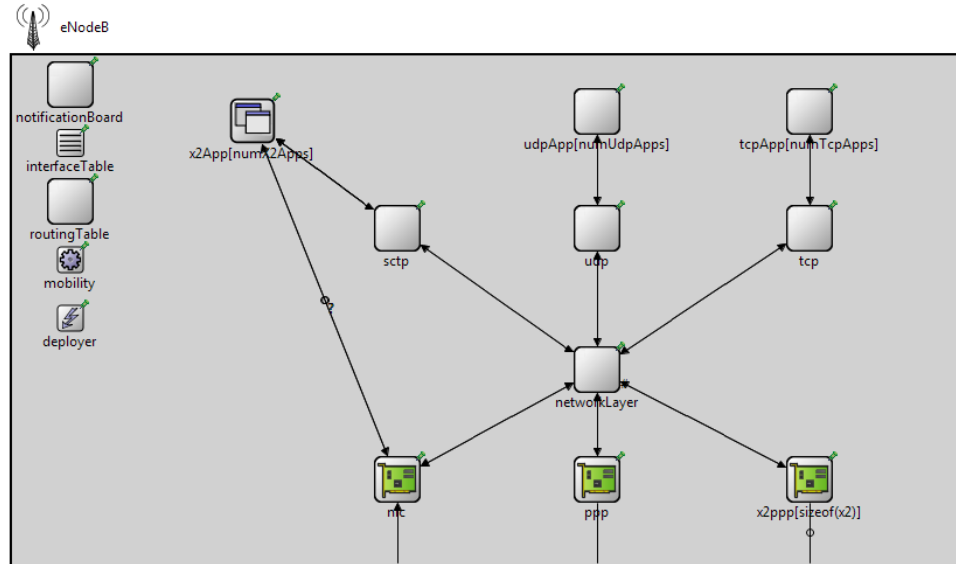
Ilustración 55. Diseño interno UE



Fuente: Elaboración propia con Omnet ++ - SimuLTE

La E_UTRAN compuesta por un solo eNodeB, se saca de la herramienta SimuLTE y se le asigna una frecuencia de funcionamiento de 700MHz, se muestra a detalle en la ilustración 56.

Ilustración 56. Diagrama de eNodeB



Fuente: Elaboración propia con Omnet ++ - SimuLTE

A continuación, se plantean tres escenarios con los tres tipos de tráfico que se espera que circulen por la red..

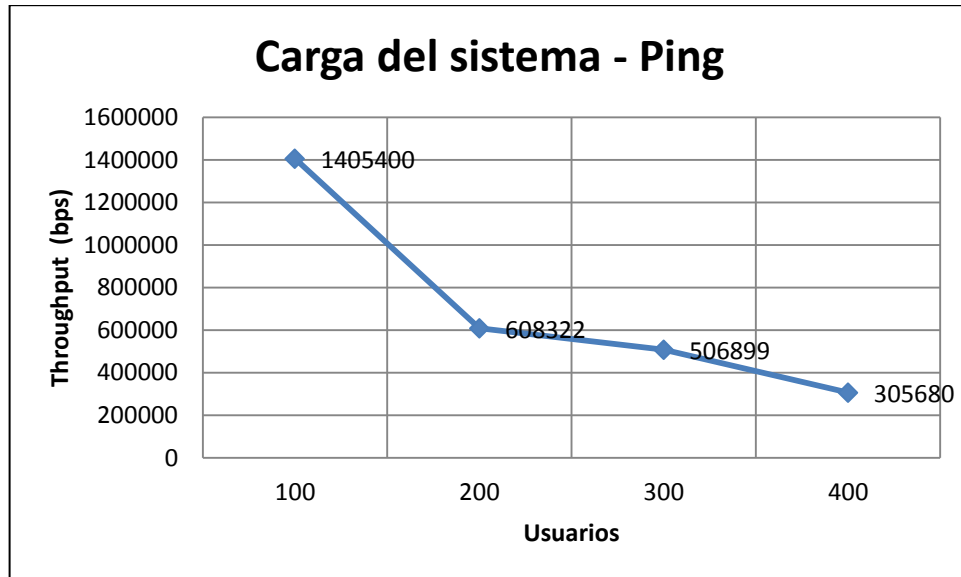
4.3.2.1 Simulación de Ping

El Ping (Packet Internet Groper) es un comando empleado para diagnosticar la conexión entre la red y una dirección IP (destino) remota⁸⁴, por medio del envío de paquetes de datos empleando el protocolo ICMP (Internet Control Message Protocol). Para este ejercicio tiene como finalidad generar una carga a la red.

Para desarrollar la simulación en OMNET ++, primero se configura a que host se le realiza la prueba (`host[].pingApp.destAddr = srv`) y luego el tiempo de los intervalos (`pingApp.interval = 200ms`). Los resultados del throughput se muestran en la ilustración 57.

⁸⁴ RAYA Jose Luis, Raya Laura, Redes Locales, Alfaomega, Mexico, 2006

Ilustración 57. Resultado ping

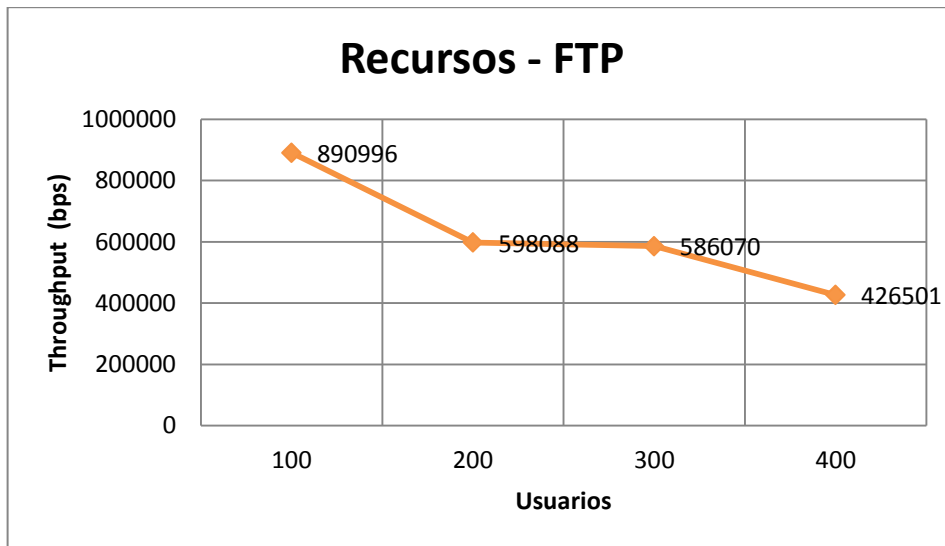


Fuente: Elaboración propia

4.3.2.2 Simulación de Archivos FTP

Esta prueba consiste simular el acceso a archivos FTP (File Transfer Protocol) que es el protocolo empleado para enviar o recibir archivos, es la comunicación básica que se realiza cuando nos conectamos a internet para ver una página web y tiene como objetivo intercambiar archivos, poniendo a prueba la conectividad con servidor FTP y accesibilidad a internet. Para este caso los clientes acceden a un archivo de 100 Kbps.

Ilustración 58. Conexión servidor ftp

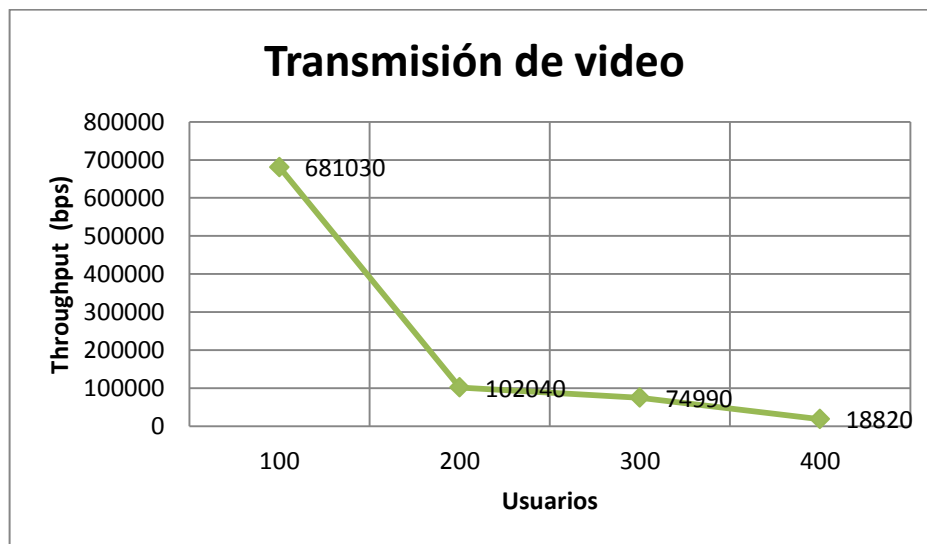


Fuente: Elaboración propia

4.3.2.3 Simulación de Transmisión de Archivos de Video

Esta prueba consiste en que los UEs realizan un streaming de video de 500 Kbps con el servidor.

Ilustración 59. Resultados archivos de video



Fuente: Elaboración propia

5. ANÁLISIS DE SIMULACIONES Y DE RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones. Primero se analizan los resultados de cobertura, obtenidos con en el software Radio Mobile y luego los resultados de las simulaciones de la red, con el programa OMNET ++. Adicionalmente, se comparan los resultados obtenidos identificando los propósitos principales de cada tecnología, ya que LTE es diseñada para entornos urbanos y WRAN para ambientes rurales.

Al emplear la frecuencia de los 700 MHz para todos los escenarios y aunque las dos tecnologías funcionan con similares interfaces, pero con diferentes aplicaciones, se observa un resultado favorable para el estándar IEEE 802.22, que específicamente se diseñó para entornos urbanos.

5.1 COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS

Al describir ambas tecnologías, se encontraron varios parámetros de funcionamiento que tienen en común, y otros, que los diferencian. Específicamente, se muestran en la tabla número 6.

Tabla 6. Comparativo de las dos tecnologías

	IEEE 802.22 – WRAN	4G - LTE
Desarrollador	IEEE	3 GPP
Objetivo	Desarrollado para entornos Rurales, donde se brinda cobertura en grandes extensiones de área, con poca densidad de usuarios.	Llevar conectividad de alta velocidad, a entornos urbanos con gran cantidad de usuarios en pequeñas áreas de cobertura.
Función	Reducir la “brecha digital”	Comercial la evolución a 4G
Enfoque	Datos	Datos, velocidad y movilidad
Uso	Rural	Urbano
Bandas de Operación (MHz)	Rango de 54 a 862	700, 850, 900, 1800, 1900, 2100 2500, 2600 y 3500
Ancho de Banda (MHz)	6,7 y 8	1.25, 1.4, 2.5, 3, 5, 10, 15 y 20
Modulación Adaptativa	64 QAM, 16 QAM y QPSK	64 QAM, 16 QAM y QPSK
Duplexación	FDD / TDD	FDD / TDD
Técnica de Acceso Physical Layer	Enlace de subida OFDMA Enlace de bajada OFDMA	Enlace de subida SC-FDMA Enlace de bajada OFDMA

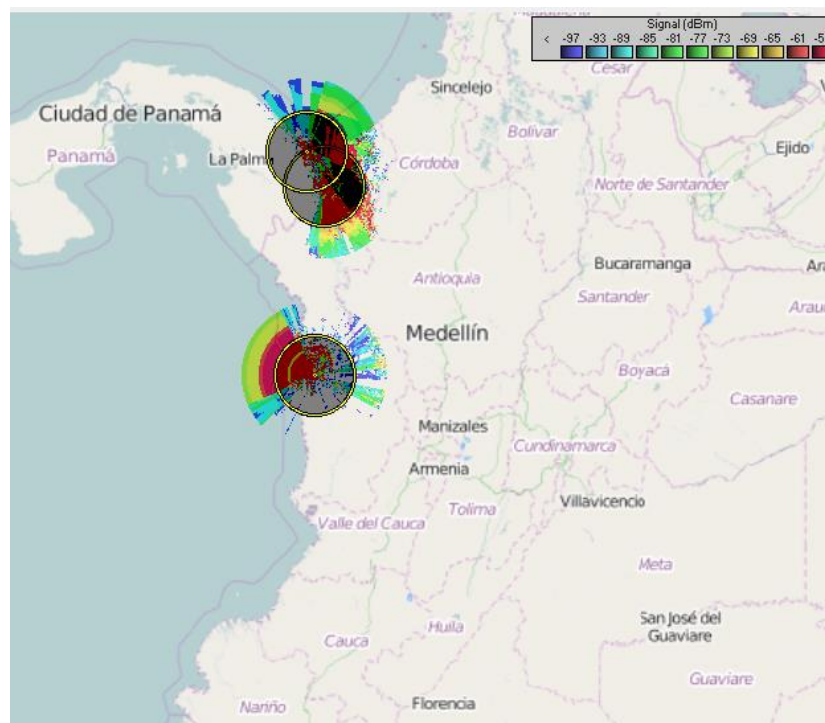
Codificación	Convolucional do, opcional LDPC o código turbo de bloqueo acertado	Convolucionado, codificador turbo o tail biting
Diferentes Características	Radio Cognitiva Bonding Channel Geo - Localización	MIMO (Multiple Input Multiple Output)
Tasa de Transmisión	Enlace de bajada 100 Mbps Enlace de subida 50 Mbps	En 64 QAM es de 23 Mbps y en QPSK Enlace de bajada 7.8 Mbps Enlace de subida 768 Kbps
Cobertura de celda (Km)	17 a 33	0.3 a 5
Arquitectura	Reducida	Reducida, SAE (System Architecture Evolution)
Topología de la red	Punto a multipunto	Punto a multipunto
Ventajas	Coexistencia con diferentes frecuencias CR (radio cognitiva), sin generar interferencia al usuario titular.	Mayor densidad de señal, brindando mejor señal a mayor cantidad de usuarios (por tener celdas más pequeñas).
	Convivencia, varias WRAN sin generar interferencia.	Interoperabilidad con tecnologías anteriores (2G, 3G, 3.G)
	QoS para VoIP, calidad de servicio para voz sobre IP.	QoS para VoIP, calidad de servicio para voz sobre IP.
	Simplicidad de la arquitectura	Simplicidad de su arquitectura System Architecture Evolution SAE
	Eficiencia espectral, DSA Dynamic Spectrum Access	Eficiencia espectral, Scheduling
Desventajas	Sensibilidad al aumento de usuarios.	Altos costos de los equipos que operan en bandas libres.
	Por su bajo enfoque comercial menor implementación de la tecnología en las regiones.	Menor cobertura de celdas, lo que conlleva a mayor inversión en infraestructura.
	Enfoque a datos no a voz.	Por su enfoque comercial, no está diseñado para ambientes rurales.
Fuente	Estandar IEEE 802.22	3GPP LTE

5.2 CONSOLIDADO Y RESULTADOS DE COBERTURA WRAN

Al observar los resultados de la simulación de cobertura realizados en cada escenario escogidos, con la herramienta Radio Mobile, se identifica, que el casco urbano de los tres municipios, logran el 100% de cobertura, ninguna Estación Base, se ubica en el casco urbano de los municipios, adicionalmente, por tener un rango de cobertura en promedio de 26 Km, la señal llega a sitios poblados que no se habían contemplado, pero que serán beneficiados, como en el caso del Bajo Baudó y Necoclí.





Como se observa en la ilustración 60, otro resultado que se muestra es la superposición de dos coberturas, entre los municipios de Ungía y Acandí, esta superposición, es generada por SB diferentes y no representa inconvenientes de interferencia para las CPE.

Ilustración 60. Cobertura WRAN



Fuente: Elaboración propia con Radio Mobile

Tabla 7. Análisis de cobertura

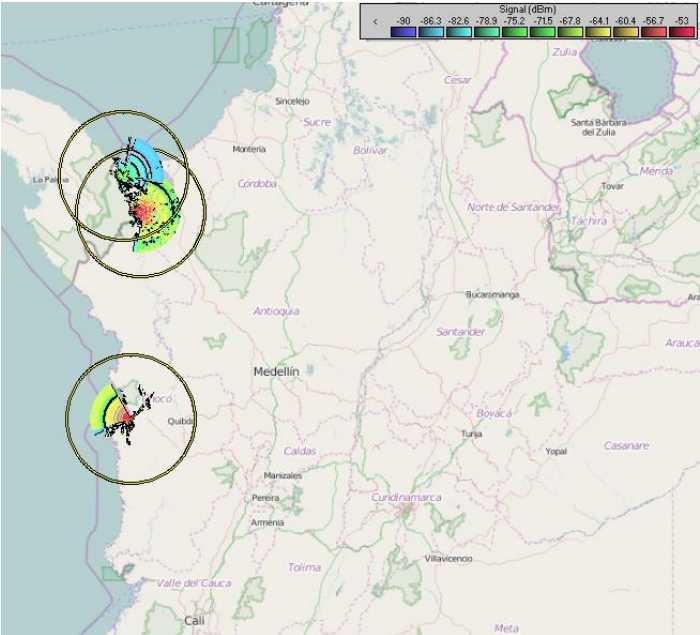
Color	Descripción
	Área donde se obtiene una excelente cobertura, y donde los CPEs pueden trabajar con las mejores condiciones de transmisión y recepción, garantizando el óptimo desempeño de la red. En esta ubicación se accede fácilmente a los servicios de internet como ftp, real time o streaming.
	Se obtiene un nivel aceptable de cobertura, sin embargo esta no es tan buena como en el caso anterior.
	Área donde a pesar de tener cobertura, los equipos no presentaran inconvenientes para conectarse a internet e intercambio de archivos ftp, pero, tendrán retardos para recibir servicios de streaming.
	Límites de la cobertura, se recomienda un traslapo para mejorar la cobertura en esta zona.

Fuente: Elaboración propia

5.3 CONSOLIDADO Y RESULTADOS DE COBERTURA LTE





Al observar los resultados de la simulación de cobertura realizado en el departamento del Chocó, con la herramienta Radio Mobile, se identifica, que el casco urbano de los tres municipios, logran el 100% de cobertura, ninguna Estación Base, se ubica en el casco urbano de los municipios, adicionalmente, por el rango de cobertura en promedio es de 17 Km. Como se observa en la ilustración 61, otro resultado que se muestra es la superposición de dos coberturas, entre los municipios de Ungía y Acandí, esta superposición, es generada por dos eNB diferentes y representan interferencias en los límites de las celdas.

Ilustración 61. Cobertura LTE



Fuente: Elaboración propia con Radio Mobile

Tabla 8. Análisis de cobertura

Color	Descripción
	Área donde se obtiene una excelente cobertura, y donde los CPEs pueden trabajar con las mejores condiciones de transmisión y recepción, garantizando el óptimo desempeño de la red. En esta ubicación se accede fácilmente a los servicios de internet como ftp, real time o streaming.
	Área donde a pesar de tener cobertura, los equipos no presentaran inconvenientes para conectarse a internet e intercambio de archivos ftp, pero, tendrán retardos para recibir servicios de streaming.
	Límites de la cobertura, se recomienda un traslapo para mejorar la cobertura en esta zona.
	No hay recepción.

Fuente: Elaboración propia

5.4 COMPARACIÓN DE COBERTURA LTE CON WRAN

Para la comparación respectiva de las simulaciones en la tabla 9 se mostrara el comportamiento de cobertura en cada municipio de las dos tecnologías.

Tabla 9. Cobertura

	WRAN (Km)	LTE (Km)
Acandí	22.5	13
Nuquí	26.5	16
Unguía	29	22
Promedio	26	17

Fuente 1: Elaboración propia

En la tabla 9 se muestran las distancias, resultado de la simulación desde la SB o eNB hasta la parte más alejada del umbral donde aún hay cobertura.

WRAN, tiene en promedio 26 Km de cobertura y LTE 17 Km en promedio de cobertura, lo que indica que una celda de LTE alcanza un 66% de la cobertura de WRAN. Demostrando que si se tiene en cuenta traslapos de un 25% entre celdas, la inversión en infraestructura sería aproximadamente el doble de WRAN para LTE.

Adicionalmente se identifica que la densidad espectral es diferente en toda la celda, debido a las elevaciones topográficas, clima y demás variables consideradas por el modelo Longley – Raise.

5.5 COMPARACIÓN DE LA RED CON OMNET ++

Como mencionamos en la sección de simulación, la red para las dos tecnologías es una red IP, que no tienen diferencias, las diferencias radican específicamente en su interfaz inalámbrica, el comportamiento en la capa PHY y MAC.

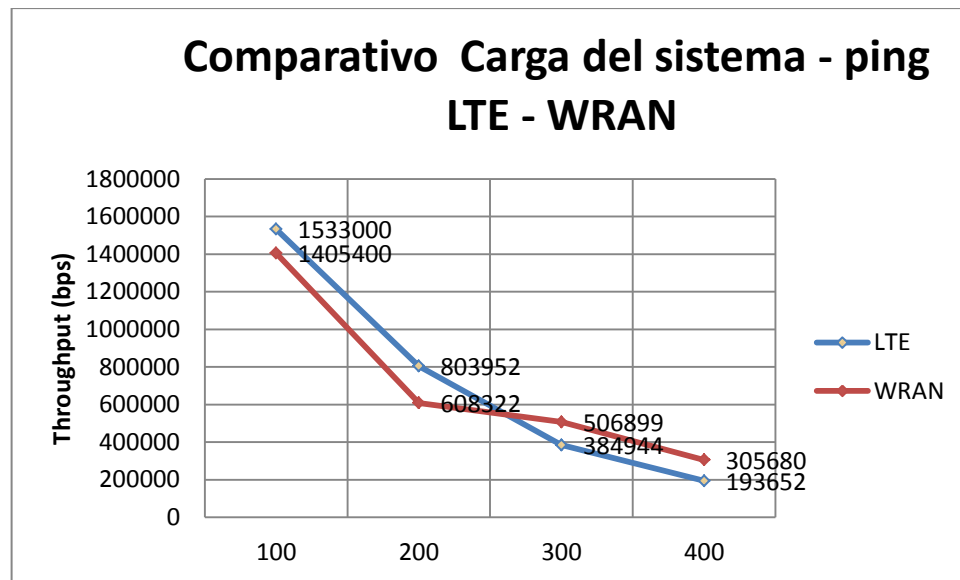
5.5. 1 Comparación de resultados de LTE contra WRAN – ping

La Ilustración 62 muestra los resultados del throughput para el escenario de ping, específicamente, para cargar la red. La caída del throughput se genera por el incremento de la cantidad de usuarios de 100 a 200. Esto se puede explicar debido al incremento de las coaliciones en el medio compartido. También, porque entre más usuarios, más paquetes circulan por la red inalámbrica, y al suceder esto incrementa el tiempo de entrega mientras continúa igual la carga útil del paquete.

Por otra parte se observa que con los primeros 200 usuarios conectados a la red, tiene mayor velocidad la tecnología WRAN, luego de esto es superado por LTE. Ambas tecnologías son bastante sensibles, la diferencia de 100 a 200 usuarios disminuyendo la velocidad más de un 40%.

Luego tener conectados 200 usuarios a la red LTE es más constante cada vez que se suman nuevos usuarios, por lo contrario WRAN continua decreciendo drásticamente su velocidad.

Ilustración 62. Comparativo entre LTE y WRAN - ping



Fuente: Elaboración propia

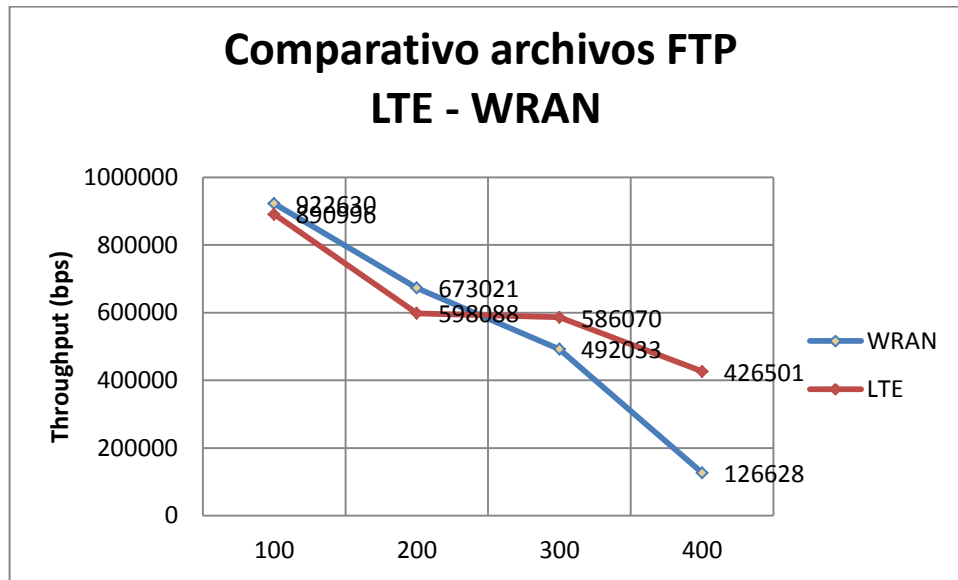
5.5.2 Comparación de resultados de LTE contra WRAN – ftp

La Ilustración 63 compara los resultados de LTE y WRAN al intercambiar archivos ftp. Se observa una velocidad de transferencia similar en las dos tecnologías con los primeros 100 usuarios, de nuevo el descenso del throughput es justificado por las coaliciones en el medio compartido que incrementa los tiempos de entrega.

Al conectarse a la red 200 usuarios, las dos tecnologías bajan aproximadamente un 30% la velocidad, con la diferencia que WRAN continua prestando tasas más altas de transmisión, en este momento LTE se estabiliza y mantiene su rendimiento con 300 usuarios, por lo contrario WRAN continua bajando la velocidad aproximadamente un 45% que cuando inicio con los 100 usuarios.

Pensando en una red de 500 usuarios LTE es más constante en mantener una velocidad promedio, por lo contrario WRAN es más sensible, tiene un gran cambio cuando inicia a cuando está cargada el 50% de la Red.

Ilustración 63. Comparativo entre LTE y WRAN - ftp



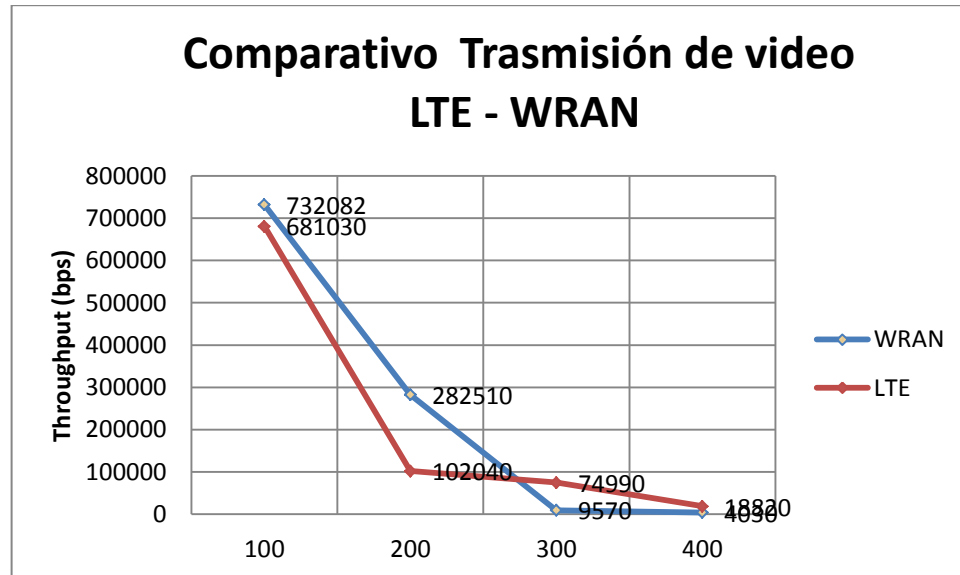
Fuente: Elaboración propia

5.5.3 Comparación de resultados de LTE contra WRAN – video

Los resultados de la simulación de transmisión de video en la Red, se observan en la ilustración 64, mostrando que un archivo de aproximadamente 800 Kbps, baja sensiblemente las prestaciones de la red, ver videos de forma online, es crítico en ambas tecnologías.

Cuando se pasa de 100 usuarios a 200, destaca el gran cambio de velocidad de transmisión. WRAN continúa con un mejor comportamiento frente a LTE. Luego de tener 200 usuarios conectados a la Red LTE mantiene constante sus velocidades al incrementar el número de usuarios y WRAN continua con su descenso en velocidades.

Ilustración 64. Comparativo entre LTE y WRAN - streaming



Fuente: Elaboración propia

5.5.4 Consolidado de las simulaciones con OMNET ++

A nivel de Red se observa un comportamiento similar de las dos tecnologías, destacando WRAN frente a LTE por tener mayor velocidad de transmisión cuando tiene pocos usuarios (100). En general se observa un bajo desempeño de las dos tecnologías con un número de usuarios mayor a 300 y mucho peor cuando se transmite video. Sin embargo, lo más probable es que la mayor parte del tiempo el tráfico de la Red sea transmisión de archivos ftp.

Al implementar, LTE con MIMO las falencias vistas en streaming mejoraran considerablemente.

Finalmente ambas tecnologías con la mitad de usuarios de la red (250) tienen comportamiento similar en cuanto a velocidad de transmisión.

CONCLUSIONES

Tal como se propuso en el primer objetivo específico, se seleccionaron tres zonas rurales del Departamento del Chocó donde no hay acceso a la banda ancha, para lo cual se tuvo en cuenta que presentaran diferentes aspectos geográficos, seleccionándose a los municipios de Acandí por su proximidad al mar Caribe, el municipio de Nuquí contiguo al océano Pacífico y el municipio de Ungía que presenta un accidente topográfico particular, una ciénaga, que implica condiciones de propagación especiales.

El segundo objetivo específico que hace referencia a la descripción de las tecnologías, se cumplió adecuadamente describiendo el estándar IEEE 802.22, que trata la tecnología WRAN, sus principios, tales como la radio cognitiva, la modulación adaptativa, unión de canales, arquitectura, componentes, protocolos y demás conceptos básicos para el entendimiento de la tecnología. Respecto a la descripción la tecnología LTE, se sintetizaron sus principales características, arquitectura, componentes, protocolos, técnicas de modulación entre otros para facilitar su comprensión.

Las simulaciones de las tecnologías abarcaron dos grandes ámbitos: La cobertura y la capacidad de red. La primera se realizó con en el software Radio Mobile, que toma datos de elevación del terreno, datos ambientales y otros parámetros que alimentan el modelo de propagación Longley - Rice, para predecir la cobertura de la señal en un sector. La segunda simulación es de la Red y se realizó con el software OMNET ++, que cuenta con una versión con licencia educativa. Se evalúa la capacidad de la red, con pruebas de conectividad, luego se realizan pruebas de envío de archivos FTP y transmisión de video, comparando cantidad de usuarios conectados con la tasa de transmisión de datos recibidos.

El estándar IEEE 802.22 es la mejor tecnología para implementar en entornos rurales. Ya que se destacó en las simulaciones de la Red con OMNET ++, al ofrecer mayor velocidad de transmisión en los tres escenarios simulados con celdas de hasta 300 usuarios. Además, fue sobresaliente en la simulación con Radio Mobile al generar celdas con un 30% de mayor cobertura que las obtenidas con la tecnología LTE.

En zonas rurales con pocos pobladores, o con tipos de usuarios primarios y secundarios, una buena alternativa es el estándar IEEE 802.22, por brindar mayor cobertura, reduciendo costos al emplear menos estaciones repetidoras y coexistir con frecuencias libres y licenciadas sin generar interferencia. Además, al poder definir los usuarios primarios o secundarios de la red puede limitarse el número de CPEs, garantizando tasas de transmisión programadas.

El problema principal del estándar IEEE 802.22 es no tener una vocación comercial, esto se evidencia al encontrar pocas alternativas para simular esta

tecnología. También, la red es muy sensible al aumento de los usuarios, por lo que toca definir el estatus de los CPEs.

La tecnología LTE presentó en las simulaciones menor área de cobertura, pero mostrando que funciona mejor que WRAN en zonas con mayor número de usuarios que se conectan a la red, por tener mayor relación entre velocidad de la red y número de usuarios conectados.

La falencia que se encontró con la tecnología LTE, es que por tener menor cobertura sus celdas, se puede duplicar la inversión en infraestructura. Adicionalmente, la banda de los 700 MHz, no es la mejor alternativa para la implementación ya que solo permite un canal de 5 MHz, donde no sobresalen las características de velocidad de transmisión de LTE como si lo haría en un canal de 20 MHz.

El estado Colombiano al brindar cobertura de banda ancha en municipios como los escogidos para la simulación, genera a sus pobladores oportunidades de mejorar su economía, educación, cultura, relación con el estado y entorno social, garantizando mayor equidad, justicia y promoviendo la paz. Por lo tanto, los planes de cobertura de banda ancha expuestos en el Plan Vive Digital, deben vincular no solo las cabeceras municipales sino además sus entornos rurales.

La cobertura de la banda ancha en la totalidad del territorio debe apoyarse con políticas nacionales, ya que comercialmente para las empresas privadas solo el 38% del territorio nacional representa beneficios económicos. Estas tecnologías inalámbricas pueden ser la solución para brindar cobertura en territorios de baja densidad poblacional y grandes extensiones de territorio.

La banda de los 700 MHz es ideal para brindar cobertura en zonas rurales del país, debido a sus características de propagación de las señales. Beneficiando a la comunidad al invertir menos en infraestructura.

RECOMENDACIONES

Mientras ocurre el “apagón analógico” en el año 2019 se recomienda, emplear el estándar IEEE 802.22, para brindar cobertura de banda ancha en zonas rurales, ya que se puede definir como usuario primario la tv análoga y como usuario secundario los CPE. LTE no se sugiere porque necesita para su funcionamiento las frecuencias “limpias”, sin interferencia. Tampoco, se recomienda la implementación de LTE en zonas rurales por la inversión mayor en infraestructura.

Para una próxima simulación de la tecnología LTE, se propone complementarla con la técnica de radio MIMO (Multiple Input Multiple Output), de esta forma se incrementara la velocidad de transmisión de cada celda.

Para una próxima simulación del estándar IEEE 802.22 se recomienda complementarla con la concatenación de canales, que es una característica posible y que en las simulaciones desarrolladas no se pudieron realizar.

El software OMNET ++, para realizar las simulaciones anteriores es una buena herramienta, pero es necesario integrarle las herramientas SimuLTE y Mixim (empleando el estándar de 802.16 y complementarlo con la herramienta de radio cognitiva), adicionalmente la librería Plover para graficar los resultados.

Como se pudo observar, en las simulaciones de WRAN se presenta un traslapo entre los municipios de Unguía y Acandí. Se sugiere un estudio de este fenómeno enfocado a los efectos percibidos por los CPE ubicados en los límites de las celdas.

Simular una red que tenga como mínimo 2 celdas, para ver los efectos de interferencia, solapamiento en LTE y handover.

El software más completo para realizar las simulaciones y que se puede emplear para ambas tecnologías es Netsim de Tetcos, que tiene en cuenta los mapas del área a implementar, y las todas las características específicas de las dos tecnologías.

BIBLIOGRAFÍA

- 4G AMÉRICAS, Adjudicación de espectro radioeléctrico en 700 MHz en América Latina. [En Línea], 4G Américas, Agosto 2015 [Citado 05-Oct-2015] Disponible en http://www.4gamericas.org/files/3914/4053/6091/Adjudicacin_de_Espectro_Radioelctrico_en_700_MHz_en_.
- AG, Longley y PL, Rice. Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain – A Computer Method 1968, página 3-24
- Alcaldía de Acandí. Nuestro Municipio: Indicadores, [En línea]. Agosto de 2013 [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet: <http://www.acandichoco.gov.co/index.shtml#3>
- Alcaldía de Nuquí. Nuestro Municipio: Información general, [En línea]. Septiembre de 2012 [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet: <http://www.nuquichoco.gov.co/index.shtml#3>
- Alcaldía de Unguía. Nuestro Municipio: Información general, [En línea]. Oct de 2012 [Citado 20-Sep-2015]. Disponible en internet: <http://www.unguia-choco.gov.co/index.shtml#5>
- BROADBAND COMMISSION. Información general, [En Línea], 2011 - [Citado 21-Septiembre-2015]. Disponible en internet. <http://www.broadbandcommission.org/about/Pages/default.aspx>
- CONGRESO DE COLOMBIA: Ley 1341 de 2009, [En Línea], 2009 - [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet. http://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-3707_documento.pdf
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA DANE: Codificación de la División Político – Administrativa de Colombia (DIVIPOLA), [En línea]. 2015 [Citado 22-Septiembre-2015] Disponible en internet: <http://geoportal.dane.gov.co:8084/Divipola/>
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, DNP. Documentos CONPES, [En Línea], [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet. <https://www.dnp.gov.co/CONPES/Paginas/conpes.aspx>
- HERRERA, Oscar, GUTIÉRREZ, Alejandro, OSPINA, Ana y GALVIS Alexander, Wran and Lte comparison in rural environments. [En línea]. 2012 [Citado 1-Sep-2015] <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6233675&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F6225461%2F6233638%2F06233675.pdf%3Farnumber%3D6233675>
- HUIDOBRO, Manuel José. Radio Cognitiva: La radio se vuelve inteligente. [En Línea], Abril 2011 [Citado 20-Sep-2015]. Disponible en: <http://www.coitt.es/res/revistas/04d%20Radio%20cognitiva.pdf>

IACOBUCCI, M. Reconfigurable Radio Systems: Network Architectures and Standards. [En Línea], Somerset, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2013 [Citado 25-Septiembre-2015] Disponible en: <http://www.ebrary.com>

IEEE 802.22 Working Group Website. Enabling Rural Broadband Wireless Access Using Cognitive Radio Technology.[En Línea], 2010 [Citado 25-Septiembre-2015] Disponible en: <http://www.ieee802.org/22/Technology/22-10-0073-03-0000-802-22-overview-and-core-t>

IEEE. STANDARD 802.22-2011: Standard for Information Technology Telecommunication and Information exchange: Cognitive Wireless RAN Y Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Computer Society, 2011. [En Línea], Junio de 2011 [Citado 25-Septiembre-2015] Disponible en: <http://standards.ieee.org/news/2011/802.22.html>

MinTIC. 25 años de gestión del FONTIC, [En Línea], 19 de Agosto de 2015 - [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet. http://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-3707_documento.pdf
<http://www.mintic.gov.co/portal/604/w3-article-12755.html>.

MinTIC. Infraestructura, [En Línea], 2014 - [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet. <http://www.mintic.gov.co/portal/vivedigital/612/w3-propertyvalue-7240.html>

MinTIC. Plan Vive Digital: Infraestructura, [En Línea], 2014 - [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet. <http://www.mintic.gov.co/portal/vivedigital/612/w3-propertyvalue-7240.html>

MinTIC: Ecosistema Digital, [En Línea], 2014 - [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en internet. <http://www.mintic.gov.co/portal/vivedigital/612/w3-propertyvalue-634.html>

MODY, A y CHOUINARD, G. Visión general del estándar IEEE 802.22 en redes de área inalámbrica y tecnologías de base regional, [En Línea], marzo de 2010. [Citado 21-Septiembre-2015] Disponible en: <http://www.ieee802.org/22>

OMNET ++, User Manual. [En Línea], 2015 [Citado 30-Oct-2015] Disponible en: <https://omnetpp.org/doc/omnetpp/manual/usman.html>

PÉREZ VEGA, Constantino, CASANUEVA LÓPEZ, Alicia y ZAMANILLO José María. Sistemas de Telecomunicación. Santander. Publicaciones de la Universidad de Cantabria. 2007 p. 497

PIETROSEMOLI, Ermanno y ZENNARO, Marco. Redes Inalámbricas en los Países en Desarrollo. [En Línea], Jane Butler, 2013 [Citado 20-Septiembre-2015]. Disponible en: <http://wndw.net/pdf/wndw3-es/wndw3-es-ebook.pdf>

PRADILLA CERON, Juan Vicente, Tecnología de canal de retorno para el estándar DVB-T mediante el uso de WRAN. [En línea] Universidad ICESI, 2013 [Citado 25-Oct-2015] Disponible en Internet:http://bibliotecadigital.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/

RAYA Jose Luis, Raya Laura, Redes Locales, Alfaomega, Mexico, 2006. p. 56

STEVENSON, C. CHOUINARD, G. IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard, vol. 47, 1 ed, Janeiro: IEEE Communication Magazine, 2009. p. 130-138

UNCTAD, United Nations Conference on Trade and Development Information Economy Report [En Línea] Mar. 2010. p74. [Citado 15-Mayo-2015]. Disponible en internet: www.unctad.org/en/Docs/ier_2010_en.pdf

UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES UIT. Banda Ancha en los países Andinos: tecnología, regulación y mercado – Análisis de situación y perspectivas 2015. Ginebra: ITU, 2014. p.276

UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES. Recomendación UIT-T E.800: Calidad de los servicios de telecomunicación. Ginebra: 2009. 28 p. . (s.f.).

VODAFONE. AGUSTI COMES, Ramón, ÁLVAREZ, Francisco, ROMERO, Jordi y FERRÚS Ramón. LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles. [En Línea], Fundación Vodafone España, 2010 [Citado 05-Oct-2015] Disponible en:<http://www.fundacionvodafone.es/sites/default>

World Economic Forum. The Global Information Technology Report 2009 - 2010. [En Línea] P 11. [Citado 15-Mayo-2015]. Disponible en: www3.weforum.org/docs/WEF_GITR_Report_2010.pdf